

TUGAS AKHIR - TE 141599

Analisis Stabilitas Transient dengan Mempertimbangkan Respon Stabil dari Sudut Rotor, Frekuensi dan Tegangan di Sistem Sumatera Utara 150kV/275kV Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) Tahun 2023

Norma Mahmudah
NRP 07111545000030

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
Prof. Dr. Eng. Imam Robandi

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**Analisis Stabilitas Transient dengan
Mempertimbangkan Respon Stabil pada Sudut
Rotor, Frekuensi Dan Tegangan di Sistem
Sumatera Utara 150kV/275kV Berdasarkan
Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik
(RUPTL) Tahun 2023**

Norma Mahmudah
NRP 07111545000030

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
Prof. Dr. Eng. Imam Robandi

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

**Transien Stability Analysis Considering Stable
Response of Angle Rotor, Frequency and Voltage In
North Sumatera 150kV / 275kV By General Plan
Supplying Electrical Energy in 2023**

Norma Mahmudah
NRP 07111545000030

Advisor
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
Prof. Dr. Eng. Imam Robandi

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Analisis Stabilitas Transient dengan Mempertimbangkan Respon stabil dari Sudut Rotor, Frekuensi dan Tegangan di Sistem Sumatera Utara 150 kV/275 kV Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) Tahun 2023”** adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2018

Norma Mahmudah
Nrp. 07111545000030

**ANALISIS STABILITAS TRANSIENT DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN RESPON STABIL PADA SUDUT
ROTOR, FREKUENSI DAN TEGANGAN DI SISTEM
SUMATERA UTARA 150KV/275KV BERDASARKAN
RENCANA USAHA PENYEDIAAN TENAGA LISTRIK
(RUPTL) TAHUN 2023**

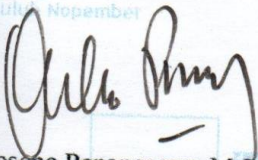
TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

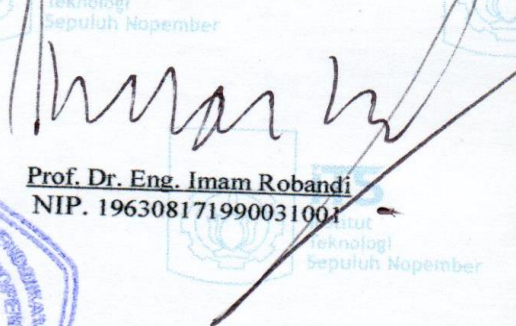
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dosen Pembimbing II



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc. Ph.D
NIP. 194907151974121001

Prof. Dr. Eng. Imam Robandi
NIP. 196308171990031001



**ANALISIS STABILITAS TRANSIENT DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN RESPON STABIL PADA
SUDUT ROTOR, FREKUENSI DAN TEGANGAN DI
SISTEM SUMATERA UTARA 150KV/275KV
BERDASARKAN RENCANA PENYEDIAAN TENAGA
LISTRIK (RUPTL) TAHUN 2023**

Nama : Norma Mahmudah
NRP : 07111545000030
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
Dosen Pembimbing 2 : Prof. Dr. Eng. Imam Robandi

ABSTRAK

Kebutuhan listrik akan tenaga listrik terus meningkat terutama pada sistem kelistrikan Sumatera Utara 150/275kV. Dalam upaya memenuhi kebutuhan tenaga listrik di Sumatera Utara terdapat 5 penambahan pembangkit baru yaitu PLTP Sipaholon Ria-Ria, PLTA Batang Toru, PLTA Simonggo 2, PLTA Sibundong 4, dan PLTU Sumut 2 dengan kapasitas total 1295 MW. Dari hasil simulasi Pelepasan generator, pelepasan satu saluran dan saluran ganda sistem tidak kehilangan sinkronisasi. Pada *study* kasus pelepasan generator sistem hanya kehilangan daya 5% dari total daya yang dibangkitkan. Begitu pula pada *study* kasus *single pole auto reclosing* saat terjadi hubung singkat 1 fasa ketanah pada saluran sei rotan-percut terjadi penurunan tegangan saat kondisi beban peak 66.7% dan pada kondisi beban normal 68.63% dari tegangan nominalnya dengan waktu CB *open* 0.2 detik dan CB *close* 0.9 detik setelah gangguan. dan *study* kasus *critical clearing time* saat terjadi hubung singkat 3 fasa pada saluran sei rotan-percut waktu yang direkomendasikan saat kondisi peak 0.300-0.301 detik dan kondisi normal 0.625-0.626 detik.

Kata Kunci : Kestabilan Transient, Pelepasan Generator, Pelepasan Saluran, *Single Pole Auto Reclosing*, *Critical Clearing Time*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

**TRANSIEN STABILITY ANALYSIS CONSIDERING
STABLE RESPONSE OF ANGLE ROTOR,
FREQUENCY AND VOLTAGE IN NORTH SUMATERA
150KV / 275KV BY GENERAL PLAN SUPPLYING
ELECTRICAL ENERGY IN 2023**

Name : Norma Mahmudah
NRP : 07111545000030
Supervisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
Supervisor II : Prof. Dr. Eng. Imam Robandi

ABSTRACT

Electricity requirement for electrical power continues to increase on the electrical system of North Sumatera 150/270kV. In order to fulfill electricity requirement in the North Sumatera, there are 5 additional of new power plant, such as PLTP Sipaholon Ria-Ria, PLTA Batang Toru, PLTA Simonggo 2, PLTA Sibundong 4, and PLTU Sumut 2 with total capacity of 1295 MW. From the simulation result of generator out, single circuit trip and double circuit trip, system does not lose synchronization. In the case study generator out, system loses only 5% power from total power generated. Similarly, in the case study of single pole auto reclosing when there is a short circuit of 1 phase to the ground at the sei rotan-percut line occur a voltage drop in peak load condition of 66.7% and in the normal load conditions 68.63% of its nominal voltage with CB open time of 0.2 seconds and CB close 0.9 seconds after interruption. and case study of critical clearing time when there is a short circuit of 3 phase at the sei rotan-percut line, recommended time in the peak condition is 0.300-0.301 seconds and in the normal condition is 0.625-0.626 seconds.

Keywords : transient stability, generator out, line trip, single pole auto reclosing, critical clearing time.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, Puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas berkah dan rahmat-Nya sehingga saya selaku penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul

“ Analisa Stabilitas Transient dengan Mempertimbangkan Respon Stabil dari Sudut Rotor, Frekuensi, dan Tegangan di Sistem Sumatera Utara 150/275 kV. Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) Tahun 2023”

Tugas Akhir merupakan persyaratan menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, saya sebagai penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. ALLAH SWT karena tanpaNya penulis tidak akan bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
 2. Kedua Orang tua saya memberikan saya doa agar saya bisa menyelesaikan tugas akhir ini.
 3. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang selaku dosen pembimbing yang telah bersedia memberikan saya plan untuk Tugas Akhir dan selalu memberikan bimbingan dalam mengerjakan Tugas Akhir
 4. Bapak Prof. Dr. Eng. Imam Robandi selaku dosen pembimbing yang memberikan bimbingan, kritik saran dan memberikan motivasi penulis saat menjadi anggota laboratorium PSOC maupun dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
 5. Teman-teman sistem tenaga lintas jalur 2015 khususnya yang mengambil di Lab PSSSL dan PSOC yaitu fajar, anizar, vita, redho, jabar, irfan yang selalu memberikan informasi dan motivasi dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
 6. Semua pihak yang telah bersedia menyediakan waktunya untuk membantu saya yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu
- Besar harapan penulis agar buku Tugas Akhir ini bisa memberikan masukan dan mangfaaat bagi pembaca terutama Mahasiswa Teknik Elektro ITS.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xvii

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang	1
1.2	Permasalahan.....	2
1.3	Batasan Masalah.....	2
1.4	Tujuan	2
1.5	Metode Penelitian	3
1.6	Sistematika Pembahasan	3
1.7	Relevansi	4

BAB 2 DASAR TEORI

2.1	Sistem Tenaga Listrik	5
2.2	Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	7
2.1.1	Kestabilan Sudut Rotor	12
2.1.2	Kestabilan Frekuensi.....	12
2.1.3	Kestabilan Tegangan.....	12
2.2	Kestabilan Transien	13
2.3	Pemodelan pada Kestabilan Transien.....	15
2.3.1	Pemodelan pada Generator Sinkron	15
2.3.2	Pemodelan Beban	15
2.4	Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan.....	15
2.5	Pengaturan Frekuensi	19
2.5.1	Governor.....	19
2.5.2	Mode Operasi Governor	20
2.6	Metode Mempertahankan Stabilitas Sistem dari Gangguan	21

2.6.1	Mengurangi Reaktansi Seri Pada Saluran	21
2.6.2	<i>Load Shedding</i> (Pelepasan Beban).....	21
2.6.3	Menggunakan Pemutus Rangkaian Dengan Cepat (<i>High Speed Recloser</i>)	22
2.7	Gangguan yang Berpengaruh Terhadap Stabilitas Sistem.....	22
2.7.1	<i>Starting Motor</i>	22
2.7.2	Hubung Singkat (<i>Short Circuit</i>).....	22
2.7.3	Penambahan Beban Secara Tiba-Tiba.....	23
2.8	<i>Auto Recloser</i>	24
2.8.1	Jenis <i>Auto Recloser</i> Berdasarkan <i>Pole Tripping</i>	24
2.8.2	Waktu Penutupan Kembali (<i>Dead Time</i>)	24
2.9	<i>Critical Crearing Time</i>	25
2.10	Standar yang Berhubungan dengan Kestabilan Transient	25
2.10.1	Standar <i>Critical Crearing Time</i>	26
2.10.2	Standar Frekuensi.....	25
2.10.3	Standar Kedip Tegangan	27
2.10.3	Standar Tegangan.....	28

BAB 3 DATA DAN METODOLOGI

3.1	Sistem Transmisi Sumatera Utara 150/275 kV Tahun 2013	29
3.2	Data Saluran Transmisi Sumatera Utara Tahun 2023	31
3.3	Data Pembangkit Sumatera Utara Tahun 2023	35
3.4	Data Pembebanan Sumatera Utara Tahun 2023.....	38
3.5	Metodologi Simulasi.....	41

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Analisa Stabilitas Transient Pada Sistem Sumatera Utara Tahun 2023	43
4.2	Pelepasan Generator	48
4.2.1	Kondisi Beban <i>Peak</i> (Generator PLTU Sumut 2a, Delete (t=1s)	48
4.2.2	Kondisi Beban <i>Peak</i> (Generator PLTGU Sumbagut 4, Delete (t=1s)	50
4.2.3	Kondisi Beban <i>Peak</i> (Generator PLTA Asahan 3, Delete (t=1s)	52
4.2.4	Kondisi Beban Normal (Generator PLTU Sumut 2a, Delete (t=1s)	54
4.2.5	Kondisi Beban Normal (Generator PLTGU Sumbagut 1, Delete (t=1s)	57
4.2.5	Kondisi Beban Normal (Generator PLTP Sorik Merapi,	

	Delete ($t=1s$)	59
4.3	Pelepasan Satu Saluran dari Saluran Ganda Tanpa Ganguan	61
4.3.1	Kondisi Beban <i>Peak</i> (<i>Single Trip</i> , Saluran Binjai - Paya Geli)	62
4.3.2	Kondisi Beban <i>Peak</i> (<i>Single Trip</i> , Saluran P. Susu – Pangkalan Brandan)	64
4.3.3	Kondisi Beban <i>Peak</i> (<i>Single Trip</i> , Saluran PLTGU Belawan-Sei Rotan)	66
4.3.4	Kondisi Beban Normal (<i>Single Trip</i> , Saluran Pangkalan Susu – Pangkalan Brandan)	68
4.3.5	Kondisi Beban Normal (<i>Single Trip</i> , Saluran Binjai - Paya Geli)	70
4.3.6	Kondisi Beban Normal (<i>Single Trip</i> , Saluran Sei Rotan - Percut)	72
4.4	Pelepasan Dua Saluran dari Saluran Ganda Tanpa Ganguan	74
4.4.1	Kondisi Beban <i>Peak</i> (<i>Double Trip</i> , Saluran Binjai - Paya Geli)	75
4.4.2	Kondisi Beban <i>Peak</i> (<i>Double Trip</i> , Saluran Pangkalan Susu – Pangkalan Brandan)	77
4.4.3	Kondisi Beban <i>Peak</i> (<i>Double Trip</i> , Saluran PLTGU Belawan - Sei Rotan)	79
4.4.4	Kondisi Beban Normal (<i>Double Trip</i> , Saluran Pangkalan Susu – Pangkalan Brandan)	81
4.4.5	Kondisi Beban Normal (<i>Double Trip</i> , Saluran Binjai - Paya Geli)	84
4.4.6	Kondisi Beban Normal (<i>Double Trip</i> , Saluran Sei Rotan - Percut)	86
4.5	<i>Single Pole Auto Reclosing Time</i>	88
4.5.1	Kondisi Beban <i>Peak</i> pada Saluran Sei Rotan - Percut (HS 1 Fasa)	89
4.5.2	Kondisi Beban <i>Peak</i> pada Saluran PLTGU Belawan - Sei Rotan (HS 1 Fasa)	91
4.5.3	Kondisi Beban <i>Peak</i> pada Saluran Paya Pasir - Belawan (HS 1 Fasa)	94
4.5.4	Kondisi Beban Normal pada Saluran Sei Rotan - Percut (HS 1 Fasa)	96
4.5.5	Kondisi Beban Normal pada Saluran PLTGU Belawan - Sei Rotan (HS 1 Fasa)	98
4.5.5	Kondisi Beban Normal pada Saluran KIM-Percut	

	(HS 1 Fasa).....	101
4.6	<i>Critical Clearing Time</i>	103
4.6.1	Kondisi Beban <i>Peak</i> , HS 3 Fasa Bus Sei Rotan.....	103
4.6.2	Kondisi Beban <i>Peak</i> , HS 3 Fasa Bus Paya Geli.....	106
4.6.3	Kondisi Beban <i>Peak</i> , HS 3 Fasa Bus Titi Kuning.....	109
4.6.4	Kondisi Beban Normal, HS 3 Fasa Bus Sei Rotan.....	112
4.6.5	Kondisi Beban Normal, HS 3 Fasa Bus Paya Geli.....	115
4.6.5	Kondisi Beban Normal, HS 3 Fasa KIM-Percut.....	121

BAB 5 PENUTUP

5.1.	Kesimpulan.....	125
5.2.	Saran.....	126

DAFTAR PUSTAKA	127
-----------------------------	-----

INDEKS	129
---------------------	-----

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	131
--	-----

RIWAYAT HIDUP PENULIS	133
------------------------------------	-----

DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1	Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik7
Gambar 2.2	<i>Single-line diagram</i> generator dan motor8
Gambar 2.3	Diagram impedansi motor dan generator.....9
Gambar 2.4	Diagram phasor motor dan generator9
Gambar 2.5	Diagram jaringan transmisi 10
Gambar 2.6	Kurva hubungan P vs δ generator saat gangguan..... 14
Gambar 2.7	Representasi rotor generator dengan arah rotasi dan torsi elektrik dengan torsi mekanik 16
Gambar 2.8	Blok diagram <i>speed droop governor</i>20
Gambar 2.9	Batas standar operasi frekuensi abnormal untuk <i>steam turbin</i>26
Gambar 2.10	Standar kedip tegangan27
Gambar 3.1	Single line diagram sistem kelistrikan di Sumatera Utara30
Gambar 3.2	<i>Flow chart</i> metodologi42
Gambar 4.1	Respon sudut rotor saat generator Sumut 2a, <i>delete</i> ($t=1s$).....48
Gambar 4.2	Respon frekuensi saat generator Sumut 2a, <i>delete</i> ($t=1s$).....49
Gambar 4.3	Respon tegangan saat generator Sumut 2a, <i>delete</i> ($t=1s$).....50
Gambar 4.4	Respon sudut rotor saat generator PLTGU Sumbagut 4, <i>delete</i> ($t=1s$).....51
Gambar 4.5	Respon frekuensi saat generator PLTGU Sumbagut 4, <i>delete</i> ($t=1s$).....51
Gambar 4.6	Respon tegangan saat generator PLTGU Sumbagut 4, <i>delete</i> ($t=1s$).....52
Gambar 4.7	Respon sudut rotor saat generator PLTA Asahan 3, <i>delete</i> ($t=1s$).....53
Gambar 4.8	Respon frekuensi saat generator PLTA Asahan 3, <i>delete</i> ($t=1s$).....53
Gambar 4.9	Respon tegangan saat generator PLTA Asahan 3, <i>delete</i> ($t=1s$).....54

Gambar 4.10	Respon sudut rotor saat generator PLTU Sumut 2a, <i>delete</i> (t=1s).....	55
Gambar 4.11	Respon frekuensi saat generator PLTU Sumut 2a, <i>delete</i> (t=1s).....	55
Gambar 4.12	Respon tegangan saat generator PLTU Sumut 2a, <i>delete</i> (t=1s).....	56
Gambar 4.13	Respon sudut rotor saat generator PLTGU Sumbagut 1, <i>delete</i> (t=1s).....	57
Gambar 4.14	Respon frekuensi saat generator PLTGU Sumbagut 1, <i>delete</i> (t=1s).....	58
Gambar 4.15	Respon tegangan saat generator PLTGU Sumbagut 1, <i>delete</i> (t=1s).....	58
Gambar 4.16	Respon sudut rotor saat generator PLTP Sorik Merapi, <i>delete</i> (t=1s)	59
Gambar 4.17	Respon frekuensi saat generator PLTP Sorik Merapi, <i>delete</i> (t=1s)	60
Gambar 4.18	Respon tegangan saat generator PLTP Sorik Merapi, <i>delete</i> (t=1s)	61
Gambar 4.19	Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran Binjai ke Paya Geli	62
Gambar 4.20	Respon frekuensi, saat pelepasan satu saluran Binjai ke Paya Geli	63
Gambar 4.21	Respon tegangan, saat pelepasan satu saluran Binjai ke Paya Geli	63
Gambar 4.22	Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran Pangkalan Susu ke P.Brandan.....	64
Gambar 4.23	Respon frekuensi, saat pelepasan satu saluran Pangkalan Susu ke P.Brandan.....	65
Gambar 4.24	Respon tegangan, saat pelepasan satu saluran Pangkalan Susu ke P.Brandan.....	65
Gambar 4.25	Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran PLTGU Belawan ke Sei Rotan.....	66
Gambar 4.26	Respon frekuensi, saat pelepasan satu saluran PLTGU Belawan ke Sei Rotan.....	67
Gambar 4.27	Respon tegangan, saat pelepasan satu saluran PLTGU Belawan ke Sei Rotan.....	67
Gambar 4.28	Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran Pangkalan Susu ke P.Brandan	68

Gambar 4.29	Respon frekuensi, saat pelepasan satu saluran Pangkalan Susu ke P.Brandan	69
Gambar 4.30	Respon tegangan, saat pelepasan satu saluran Pangkalan Susu ke P.Brandan	70
Gambar 4.31	Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran Binjai ke Paya Geli	71
Gambar 4.32	Respon frekuensi, saat pelepasan satu saluran Binjai ke Paya Geli	71
Gambar 4.33	Respon tegangan, saat pelepasan satu saluran Binjai ke Paya Geli	72
Gambar 4.34	Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran Sei Rotan ke Percut.....	73
Gambar 4.35	Respon frekuensi, saat pelepasan satu saluran Sei Rotan ke Percut.....	74
Gambar 4.36	Respon tegangan, saat pelepasan satu saluran Sei Rotan ke Percut.....	74
Gambar 4.37	Respon sudut rotor, saat pelepasan dua saluran Binjai ke Paya Geli	75
Gambar 4.38	Respon frekuensi, saat pelepasan dua saluran Binjai ke Paya Geli	76
Gambar 4.39	Respon tegangan, saat pelepasan dua saluran Binjai ke Paya Geli	76
Gambar 4.40	Respon sudut rotor, saat pelepasan dua saluran Pangkalan Susu ke P.Brandan	77
Gambar 4.41	Respon frekuensi, saat pelepasan dua saluran Pangkalan Susu ke P.Brandan	78
Gambar 4.42	Respon tegangan, saat pelepasan dua saluran Pangkalan Susu ke P.Brandan	79
Gambar 4.43	Respon sudut rotor, saat pelepasan dua saluran PLTGU Belawan ke Sei Rotan.....	80
Gambar 4.44	Respon frekuensi, saat pelepasan dua saluran PLTGU Belawan ke Sei Rotan.....	81
Gambar 4.45	Respon tegangan, saat pelepasan dua saluran PLTGU Belawan ke Sei Rotan.....	81
Gambar 4.46	Respon sudut rotor, saat pelepasan dua saluran Pangkalan Susu ke P. Brandan	81
Gambar 4.47	Respon frekuensi, saat pelepasan dua saluran Pangkalan Susu ke P. Brandan	83

Gambar 4.48	Respon tegangan, saat pelepasan dua saluran Pangkalan Susu ke P. Brandan	83
Gambar 4.49	Respon sudut rotor, saat pelepasan dua saluran Binjai ke Paya Geli	89
Gambar 4.50	Respon frekuensi, saat pelepasan dua saluran Binjai ke Paya Geli	85
Gambar 4.51	Respon tegangan, saat pelepasan dua saluran Binjai ke Paya Geli	86
Gambar 4.52	Respon sudut rotor, saat pelepasan dua saluran Sei Rotan – Percut	87
Gambar 4.53	Respon frekuensi, saat pelepasan dua saluran Sei Rotan – Percut	87
Gambar 4.54	Respon tegangan, saat pelepasan dua saluran Sei Rotan – Percut	88
Gambar 4.55	Respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah Sei Rotan – Percut	89
Gambar 4.56	Respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah Sei Rotan – Percut	90
Gambar 4.57	Respon tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah Sei Rotan – Percut	91
Gambar 4.58	Respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan – Sei Rotan	92
Gambar 4.59	Respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan – Sei Rotan	92
Gambar 4.60	Respon tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan – Sei Rotan	93
Gambar 4.61	Respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah Paya Pasir – Belawan.....	94
Gambar 4.62	Respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah Paya Pasir – Belawan.....	95
Gambar 4.63	Respon tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah Paya Pasir – Belawan.....	95
Gambar 4.64	Respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah Sei Rotan – Percut	96
Gambar 4.65	Respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah Sei Rotan – Percut	97
Gambar 4.66	Respon tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah Sei Rotan – Percut	98

Gambar 4.67	Respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan – Sei Rotan	99
Gambar 4.68	Respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan – Sei Rotan	99
Gambar 4.69	Respon tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan – Sei Rotan	100
Gambar 4.70	Respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah KIM – Percut.....	101
Gambar 4.71	Respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah KIM – Percut.....	102
Gambar 4.72	Respon tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah KIM – Percut.....	102
Gambar 4.73	Respon sudut rotor stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.300 detik	104
Gambar 4.74	Respon frekuensi stabil saat CB <i>open</i> 0.300 detik	104
Gambar 4.75	Respon sudut rotor tidak stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.301 detik	105
Gambar 4.76	Respon frekuensi stabil saat CB <i>open</i> 0.301 detik	106
Gambar 4.77	Respon sudut rotor stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.321 detik	107
Gambar 4.78	Respon frekuensi stabil saat CB <i>open</i> 0.321 detik	107
Gambar 4.79	Respon sudut rotor tidak stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.322 detik	108
Gambar 4.80	Respon frekuensi stabil saat CB <i>open</i> 0.322 detik	109
Gambar 4.81	Respon sudut rotor stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.343 detik	110
Gambar 4.82	Respon frekuensi stabil saat CB <i>open</i> 0.343 detik	110
Gambar 4.83	Respon sudut rotor tidak stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.344 detik	111
Gambar 4.84	Respon frekuensi stabil saat CB <i>open</i> 0.344 detik	112
Gambar 4.85	Respon sudut rotor stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.625 detik	113

Gambar 4.86	Respon frekuensi stabil saat CB <i>open</i> 0.625 detik	113
Gambar 4.87	Respon sudut rotor tidak stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.626 detik	114
Gambar 4.88	Respon frekuensi stabil saat CB <i>open</i> 0.626 detik	114
Gambar 4.89	Respon sudut rotor stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.799 detik	116
Gambar 4.90	Respon frekuensi tidak stabil saat CB <i>open</i> 0.799 detik	116
Gambar 4.91	Respon sudut rotor tidak stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.800 detik	117
Gambar 4.92	Respon frekuensi tidak stabil saat CB <i>open</i> 0.800 detik	118
Gambar 4.93	Respon sudut rotor stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.796 detik	119
Gambar 4.94	Respon frekuensi stabil saat CB <i>open</i> 0.796 detik	119
Gambar 4.95	Respon sudut rotor stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.797 detik	120
Gambar 4.96	Respon frekuensi tidak stabil saat CB <i>open</i> 0.797 detik	120
Gambar 4.97	Respon sudut rotor stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.710 detik	121
Gambar 4.98	Respon frekuensi stabil saat CB <i>open</i> 0.710 detik	122
Gambar 4.99	Respon sudut rotor tidak stabil kritis saat CB <i>open</i> 0.711 detik	123
Gambar 4.100	Respon frekuensi stabil saat CB <i>open</i> 0.711 detik	123

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 2.1	Waktu de-ionisasi24
Tabel 2.2	Standar frekuensi 60 Hz Berdasarkan IEEE Std C37.106-2003 <i>Western Electric Coordinating Council</i> (WECC).....26
Tabel 2.3	Konversi dari standar frekuensi 60 Hz ke 50 Hz.....27
Tabel 2.4	Standar Kedip Tegangan28
Tabel 2.5	Standar tegangan PLN28
Tabel 3.1	Data saluran transmisi pada sistem Sumatera Utara tahun 201331
Tabel 3.2	Data kapasitas pembangkit kondisi <i>peak</i> dan normal..35
Tabel 3.3	Data beban per gardu induk saat kondisi <i>peak</i> dan normal.....38
Tabel 4.1	<i>Study</i> kasus stabilitas transient di Sumatera Utara44
Tabel 4.2	Aliran daya saat beban <i>peak</i>46
Tabel 4.3	Aliran daya saat beban normal46
Tabel 4.4	Hubung singkat 1 fasa ke tanah saat beban <i>peak</i>46
Tabel 4.5	Hubung singkat 1 fasa ke tanah saat beban normal.....47
Tabel 4.6	Hubung singkat 3 fasa saat beban <i>peak</i>47
Tabel 4.7	Hubung singkat 3 fasa saat beban normal.....47

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan sistem tenaga listrik setiap tahunnya mengalami peningkatan karena kebutuhan beban yang terus meningkat, hal ini berdasarkan peningkatan pertumbuhan ekonomi, pertumbuhan penduduk dan peningkatan rasio elektrifikasi di masa mendatang, Terutama pada sistem kelistrikan Sumatera Utara pada tahun 2023 berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) terdapat penambahan 5 pembangkit baru diantaranya PLTP Sipaholon Ria-Ria, PLTA Batang Toru, PLTA Simonggo 2, PLTA Sibundong, dan PLTU Sumut 2 dengan kapasitas total 1.295 MW. Adanya penambahan pembangkit baru mengakibatkan perubahan konfigurasi sistem kelistrikan Sumatera Utara yang berpengaruh terhadap kestabilan sistem tenaga listrik terutama kestabilan transient.

Kestabilan transient merupakan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi seimbang setelah terjadi gangguan secara tiba-tiba selama satu *swing* yang pertama dengan syarat Governor dan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) belum berkerja.

Gangguan dalam analisis kestabilan transient salah satunya adalah perubahan beban yang bersifat mendadak mengakibatkan sistem tidak berada pada batas stabil, gangguan hubung singkat menyebabkan daya suplai akan lebih besar dari pada daya beban, dan generator *trip* merupakan gangguan pada sistem transmisi yang menyebabkan ketidak-seimbangan antara daya suplai dan daya beban. Gangguan-gangguan ini harus segera diatasi agar sistem dalam kondisi aman. Sebagai contoh saat kasus lepasnya saluran ganda yang memiliki aliran daya terbesar lepas dari sistem maka sudut rotor akan terjadi osilasi, jika sudut rotor dapat kembali dalam keadaan *steady state* maka sistem masih dikatakan stabil dan jika tidak dapat kembali maka sistem tidak stabil. Frekuensi dan tegangan juga harus dapat kembali dalam keadaan *steady state* maka sistem masih dalam *range* aman.

Analisis stabilitas transient di Sumatera Utara 150kV/275kV dipandang perlu karena adanya perubahan konfigurasi yaitu penambahan kapasitas pembangkit di Sumatera Utara pada tahun 2023. Oleh karena itu, ada tugas akhir ini akan dibahas *study* kasus meliputi pelepasan pembangkit, pelepasan satu saluran dari saluran ganda tanpa adanya gangguan, pelepasan dua saluran dari saluran ganda tanpa adanya gangguan,

single pole auto reclosing akibat gangguan hubung singkat satu fasa ketanah dan *critical clearing time* akibat gangguan hubung singkat tiga fasa dengan memperhatikan respon stabil sistem.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana respon stabil dari sudut rotor, frekuensi dan tegangan saat dilakukan analisis stabilitas transient setelah penambahan pembangkit pada sistem Sumatera Utara tahun 2023?
2. Bagaimana menentukan *critical clearing time* (CCT) setelah terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa agar tetap stabil di sistem Sumatera Utara tahun 2023?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang akan di bahas dalam tugas akhir ini sebagai berikut :

1. Pemodelan sistem tenaga listrik di Sumatera Utara tahun 2023 menggunakan software ETAB 12.6
2. *Study Kasus* yang akan dibahas dalam tugas akhir ini meliputi pelepasan generator, pelepasan saluran, *single pole auto reclosing*, *critical clearing time* (CCT) pada sistem kelistrikan Sumatera Utara tahun 2023.
3. Respon stabil pada *critical clearing time* (CCT) hanya mempertimbangkan respon sudut rotor dan frekuensi sedangkan pada pelepasan pembangkit, pelepasan saluran dan *single pole auto reclosing* mempertimbangkan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan.

1.4 Tujuan

Tujuan yang akan dicapai dalam tugas akhir ini adalah :

1. Dapat merekomendasikan sistem yang stabil disistem kelistrikan Sumatera Utara 150kV/275kV tahun 2023
2. Dapat merekomendasikan sistem kelistrikan yang handal setelah terjadi gangguan seperti hubung singkat 1 fasa ketanah dan hubung singkat tiga fasa.

1.4 Metode Penelitian

Metode yang dilakukan dalam tugas akhir “Analisis Stabilitas Transient dengan Mempertimbangkan Respon Stabil pada Sudut Rotor, Frekuensi dan Tegangan di Sistem Sumatera Utara 150 kV/275 kV Berdasarkan Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) Tahun 2023” sebagai berikut :

1. *Study Literatur*

Study Literatur ini membantu dalam menyelesaikan tugas akhir melalui beberapa referensi seperti paper, buku atau sebagainya yang berhubungan dengan topik tugas akhir yaitu analisis transient.

2. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan data sistem kelistrikan Sumatera Utara 150/275 kV meliputi pembebanan tiap gardu induk, data penambahan pembangkit, data saluran transmisi.

3. Simulasi Dan Analisis Data

Simulasi dilakukan di software Etap 12.6 meliputi pelepasan generator, pelepasan saluran, *single pole auto reclosing* dan *critical clearing time* dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, tegangan dan frekuensi

4. Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Penyusunan laporan tugas akhir ini merupakan kesimpulan dari beberapa tahapan metodologi yang diterapkan dalam bentuk laporan tugas akhir.

1.5 Sistematika Pembahasan

Terdapat lima bab yang akan di uraikan dalam sistematika penulisan. Sistematika ini berisi uraian yang akan di bahas dalam tugas akhir ini dan membantu dalam langkah-langkah penulisan buku tugas akhir :

Bab I : PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan, akan dibahas detail mengenai latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan dan relevansi.

Bab II : DASAR TEORI

Pada bab dasar teori, akan membahas tentang teori-teori penunjang seperti analisis stabilitas, analisis stabilitas transient, *single auto reclosing*, *critical clearing time* dan lain-lain sebagai bahan acuan untuk menyelesaikan tugas akhir.

Bab III : SISTEM KELISTRIKAN SUMATERA UTARA

Pada bab sistem kelistrikan Sumatera Utara, membahas tentang sistem kelistrikan, data saluran transmisi, pembebanan pembangkit, pembebanan beban analisis dan metode simulasi yang ada di sistem kelistrikan Sumatera Utara tahun 2023.

Bab IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab hasil simulasi dan analisis membahas tentang simulasi sistem kelistrikan Sumatera Utara tahun 2023 menggunakan software ETAP 12.6 simulasi ini meliputi pelepasan generator, pelepasan saluran, gangguan hubung singkat satu fasa ketanah saat kasus *single pole auto reclosing* dan gangguan hubung singkat tiga fasa untuk kasus *critical clearing time* (CCT).

Bab V : PENUTUP

Pada bab penutup akan dibahas dua hal yaitu, yang pertama kesimpulan dari analisis yang dilakukan pada bab IV dan yang kedua berisi saran dari penulis.

1.6 Relevansi

Di harapkan, hasil tugas akhir ini dapat memberikan mangfaat dan dapat dijadikan referensi untuk tugas akhir yang berhubungan dengan analisis stabilitas transient dengan *study* kasus pelepasan pembangkit, pelepasan saluran, *single pole auto reclosing* dan *critical clearing time* (CCT).

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah sebuah proses dari pusat pembangkit listrik sampai ke konsumen. Sistem tenaga listrik harus dijaga kualitas daya yang meliputi tegangan dimana tegangan harus konstan pada tegangan nominalnya, apabila tegangan tidak dijaga konstan dapat menyebabkan kerusakan alat-alat listrik yang peka terhadap perubahan tegangan. Frekuensi yang tidak stabil berakibat pada perubahan beban secara tiba-tiba dan membuat frekuensi dan dapat berakibat sistem tenaga listrik mati total.

Sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga komponen utama yaitu pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, sistem distribusi dan instalasi milik pelanggan. Setiap komponen memiliki peran masing-masing yang dijelaskan sebagai berikut :

a. Pusat Pembangkit Tenaga Listrik

Pusat pembangkit tenaga listrik ini mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, energi listrik terdapat generator yang mengerakkan listrik dan turbin sebagai penggerak mulai atau biasa disebut *primeover*.

b. Saluran Transmisi

Saluran transmisi menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit tenaga listrik yang kemudian disalurkan ke distribusi yaitu dari pusat pembangkit ke gardu induk atau dari gardu induk satu ke gardu induk lainnya menggunakan saluran transmisi yang tegangannya dinaikkan untuk meminimalisir rugi-rugi. Misalnya dari Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dengan tegangan 70 kV-150 kV dinaikan ke Saluran Udara Tegangan Extra Tinggi (SUTET) 500 kV.

c. Sistem Distribusi

Sistem distribusi ini berperan untuk mengatur distribusi tenaga listrik saluran menengah yaitu 6 kV dan 20 kV dan diturunkan melalui trafo *step down* menjadi 380 V, 220 V sehingga dapat disalurkan ke konsumen.

2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi seimbang antara daya *input* mekanis pada *prime mover* dengan daya *output* listrik pada generator setelah terjadi gangguan yang bersifat mendadak[1]. Dalam sistem tenaga listrik terdapat dua gangguan yang mempengaruhi kestabilan yaitu :

1. Gangguan Kecil

Gangguan kecil adalah gangguan yang berakibat pada sisi pembangkit atau sisi beban secara acak, pelan dan mengalami penurunan atau peningkatan. Misalnya saat pemutusan saluran yang akibatnya tidak terlalu signifikan dan dapat kembali ke kondisi *steady state*.

2. Gangguan Besar

Gangguan Besar adalah gangguan yang membuat perubahan signifikan di tegangan bus, gangguan ini bersifat mendadak. Seperti terjadinya hubung singkat, pelepasan beban yang bersifat mendadak. Gangguan harus segera dihilangkan karena apabila tidak segera dihilangkan akan mempengaruhi kestabilan sistem.

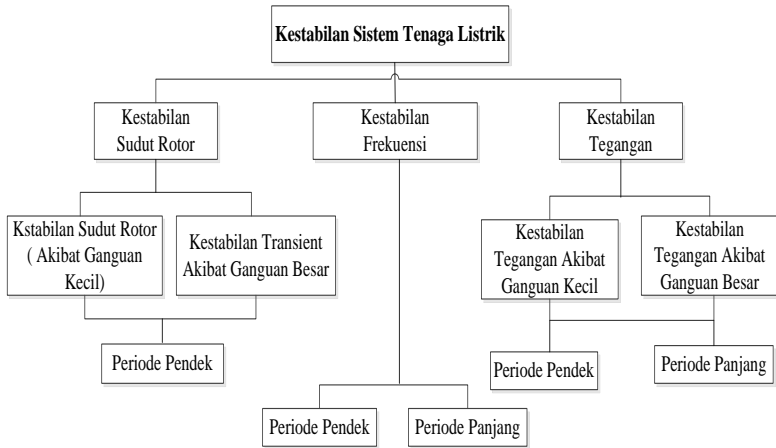
Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga kategori berdasarkan jurnal IEEE *Transaction On Power Systems*, Vol 19, No.2 pada tahun 2014 dengan judul *Definition And Classification Of Power System Stability*, yaitu[3] :

1. Kestabilan sudut rotor
2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan tegangan

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan dari mesin sinkron yang saling terhubung untuk mempertahankan kondisi seimbang antara torsi mekanis dan torsi elektromekanik. Kestabilan tegangan adalah kemampuan suatu sistem untuk menjaga agar tegangan pada setiap bus dalam *range* aman setelah mengalami gangguan. Dan yang terakhir adalah stabilitas frekuensi adalah kemampuan sistem untuk menjaga agar frekuensi tetap stabil yaitu saat terjadi gangguan, sebelum atau sesudah gangguan.

Pada gambar 2.1 menjelaskan klasifikasi kestabilan secara keseluruhan, bahwa kestabilan sistem akan terganggu apabila ada gangguan kecil atau besar. Kestabilan sistem yang handal apabila terjadi

gangguan seperti perubahan beban, hubung singkat ataupun yang bersifat mendadak dapat mempertahankan kondisi stabil atau seimbang.



Gambar 2.1 Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik[3]

2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan dari mesin sinkron yang saling terhubung untuk mempertahankan kondisi seimbang antara torsi mekanik dan torsi elektromagnetik. Dampak dari ketidak-stabilan yaitu hilangnya sinkronisasi generator dengan generator lainnya, hal ini terjadi karena kenaikan sudut rotor yang menyebabkan *output* daya pada mesin sinkron berbeda-beda sesuai osilasi pada rotor[3]. Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi 2 yaitu :

1. Gangguan Kecil pada Stabilitas Sudut Rotor

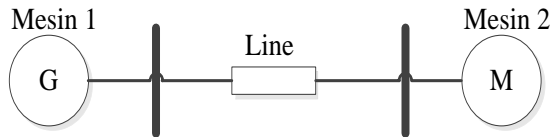
Adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi seimbang setelah terjadi gangguan kecil. Gangguan kecil dari sudut rotor bergantung pada kondisi awal sistem. Penyebab ketidak-stabilan dalam sudut rotor dibagi menjadi dua yaitu :

- a. Karena kurangnya torsi sinkronisasi, menyebabkan peningkatan sudut rotor pada kondisi tidak osilasi dan tidak periodik.

- b. Kurangnya torsi redaman, menyebabkan osilasi sudut rotor terus mengalami peningkatan.
2. Gangguan Besar pada Stabilitas Sudut Rotor

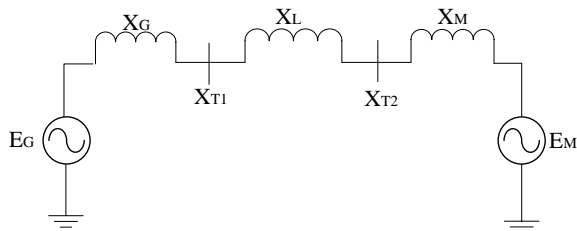
Gangguan besar dalam stabilitas sudut rotor sering disebut stabilitas transient adalah suatu kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk memperpertahankan kondisi seimbang saat terjadi gangguan besar. Gangguan besar yang dimaksud, misalnya hubung singkat, pelepasan beban yang terjadi secara mendadak[3].

Karakteristik hubungan daya dan posisi rotor adalah karakteristik yang paling penting dalam mesin sinkron.



Gambar 2.2 *Single line diagram* generator dan motor[4]

Pada Gambar 2.2 menjelaskan dua mesin sinkron yang terinterkoneksi melalui saluran transmisi yang memiliki reaktansi. Reaktansi saluran transmisi dalam kasus ini adalah reaktansi induktif X_L , kapasitansi dan resistansi dapat diabaikan karena nilai nya relatif kecil. Generator sinkron mewakili mesin G sedangkan motor sinkron mewakili mesin M. Gambar 2.3 adalah diagram impedansi generator dan motor yang merupakan implementasi dari *single line diagram* generator dan motor.



Gambar 2.3 Diagram impedansi motor dan generator[4]

Dimana :

E_G adalah tegangan internal generator

E_M adalah tegangan internal motor

X_G adalah reaktansi internal generator

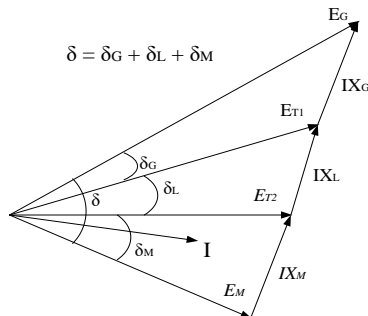
X_M adalah reaktansi internal motor

X_L adalah reaktansi saluran

Terdapat tiga komponen pembeda sudut δ yaitu sudut internal generator, sudut internal motor dan perbedaan sudut tegangan antara motor dan generator. Motor disuplai oleh daya generator sebagai fungsi pembeda sudut δ antara rotor kedua mesin yaitu rotor generator dan mesin.

Saat rotor generator mendahului medan putar pada stator terbentuklah sebuah sudut yang disebut sudut internal generator δ_G . Ketika tegangan generator mendahului tegangan motor terbentuklah sudut yang disebut δ_L . Dan yang terakhir sudut internal motor δ_M merupakan sudut saat rotor tertinggal oleh medan putar stator motor.

Dibawah ini merupakan bentuk hubungan antara tegangan internal motor E_M dengan tegangan internal generator E_G . Yang ditunjukkan oleh diagram fasor pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Diagram fasor motor dan generator[4]

Gambar 2.4 diperoleh suatu persamaan yang menyatakan hubungan daya generator yang ditransfer dalam fungsi sudut ke motor. Pada Gambar 2.3 akan di ubah menjadi bentuk yang sederhana untuk mempermudah mencari persamaan sudut daya yang biasa digunakan

untuk stabilitas. Dimana : E'_1 adalah tegangan peralihan, E'_2 adalah tegangan motor dan jaringan transmisi, reaktansi generator dan reaktansi motor dijadikan satu seperti terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram jaringan transmisi[4]

Gambar 2.5 didapatkan matrix sebagai berikut

$$Y_{Real} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Dari persamaan 2.1 didapatkan persamaan aliran daya sebagai berikut :

$$P_k - jQ_k = V_k^* \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (2.2)$$

Nilai k dan N adalah 1 dan 2 secara berturut-turut sama dan mengubah variabel V menjadi E'_2 sehingga didapatkan persamaan :

$$P_1 + Q_1 = E'_1 (Y_{11} E'_1)^* + E'_1 Y_{12} E'_2)^* \quad (2.3)$$

Didefinisikan menjadi :

$$E'_1 = |E'_1| < \delta_1 \quad E'_2 = |E'_2| < \delta_2 \quad (2.4)$$

$$Y_{11} = G_{11} + jB_{11} \quad Y_{12} = G_{12} + j\delta_2 \quad (2.5)$$

Sehingga di peroleh persamaan sebagai berikut :

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1||E'_2||Y_{11}| \cos (\delta_1 - \delta_2 - \delta_{12}) \quad (2.6)$$

$$Q_1 = -|E'_1|^2 B_{11} + |E'_1||E'_2||Y_{11}| \sin (\delta_1 - \delta_2 - \delta_{12}) \quad (2.7)$$

Pada aliran 2 berlaku rumus berlaku sama hanya bertukar *subscript*.
Sehingga, rumus dimisalkan :

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (2.8)$$

Didapatkan sudut baru γ

$$\gamma = \theta_2 - \frac{\pi}{2} \quad (2.9)$$

Persamaan 2.9 dimasukkan ke persamaan 2.6 menjadi :

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1||E'_2||Y_{11}| \sin(\delta - \gamma) \quad (2.10)$$

Pada persamaan 2.10 dapat disederhanakan menjadi :

$$P_e = P_c + \sin(\delta - \gamma) \quad (2.11)$$

Persamaan 2.11 dapat dikatakan persamaan sudut daya yang menjelaskan sebagai berikut :

1. Variabel P_e mewakili *output* daya listrik sehingga rugi jangkar dapat diabaikan.
2. Variabel P_c, P_{max}, δ merupakan konstanta jaringan tertentu
3. Besaran tegangan $|E'_1|$ dan $|E'_2|$ merupakan konstanta
4. Semua unsur Y_{Real} merupakan suseptansi maka γ dan $G_{11} = 0$ (Jika tidak dianggap resistansi)

Persamaan sudut daya untuk jala-jala reaktansi murni, persamaan sebagai berikut :

$$P_e = \frac{|E'_{t1}| |E'_{t2}|}{x} \sin \delta \quad (2.12)$$

Sehingga diperoleh :

$$X = X_G + X_L + X_M \quad (2.13)$$

Sesuai Gambar 2.3 Variabel X merupakan variabel transfer antara E'_1 dan E'_2

2.2.2 Kestabilan Frekuensi[5]

Kestabilan frekuensi adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi seimbang antara daya suplai dan daya beban ketika terjadi gangguan. Keseimbangan daya suplai dan daya beban harus dijaga konstan agar sistem tidak keluar dari sinkronisasi sistem tenaga listrik. Terdapat dua fenomena dalam kestabilan frekuensi yaitu yang pertama saat fenomena periode pendek, pada fenomena periode pendek terjadi ketika adanya perubahan beban secara mendadak sehingga frekuensi juga turun yang mengakibatkan listrik mati total dengan durasi waktu beberapa detik. Dan yang kedua yaitu fenomena periode panjang terjadi apabila *overspeed steam turbine* atau governor tidak merespon yang menyebabkan ketidak-stabilan frekuensi selama puluhan detik sampai beberapa menit. Gangguan yang biasa terjadi dalam kestabilan frekuensi :

1. Frekuensi keluar dari batas standart secara terus menerus. Batas kestabilan frekuensi yaitu 50 Hz dengan toleransi 0,6 Hz.
2. Frekuensi keluar dari batas standart sementara yaitu ketika terjadi penurunan atau kenaikan terjadi secara tiba-tiba.

2.2.3 Kestabilan Tegangan[5]

Kestabilan tegangan adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi tegangan yang stabil pada semua bus saat terjadi gangguan. Kondisi stabil ini, terganggu pada keseimbangan antara suplai daya pada pembangkit dan kebutuhan beban.

Ketidak-stabilan tegangan dapat mengakibatkan gangguan kenaikan atau penurunan tegangan. Saat terjadi kenaikan tegangan pada sistem, arus yang mengalir pada sistem akan meningkat yang menyebabkan rugi daya mengalami peningkatan yang akan memperpendek umur kerja dari peralatan.

Tegangan lebih terjadi akibat eksitasi berlebihan pada generator listrik, pengaturan beban kapasitif yang berlebihan pada sistem distribusi, dan sambaran petir pada saluran transmisi. Saat terjadi penurunan tegangan pada sistem mengakibatkan berkurangnya intensitas cahaya pada peralatan penerangan, terjadi kesalahan operasi pada peralatan kontrol seperti *magnetic switch*, *automatic valve*.

Tegangan turun disebabkan karena kurangnya eksitasi pada generator listrik, jarak beban yang jauh dari sistem distribusi, saluran transmisi yang terlalu panjang. Gangguan Ketidak-stabilan juga menyebabkan kedip tegangan dalam periode singkat (ms), penyebabnya karena, terjadinya hubung singkat fasa dengan tanah atau fasa dengan fasa. Salah satu faktor utama ketidak-stabilan tegangan adalah ketika gangguan yang terjadi menyebabkan kebutuhan daya reaktif diatas kapasitas daya reaktif yang tersedia. Kestabilan tegangan di klasifikasikan menjadi beberapa kategori yaitu :

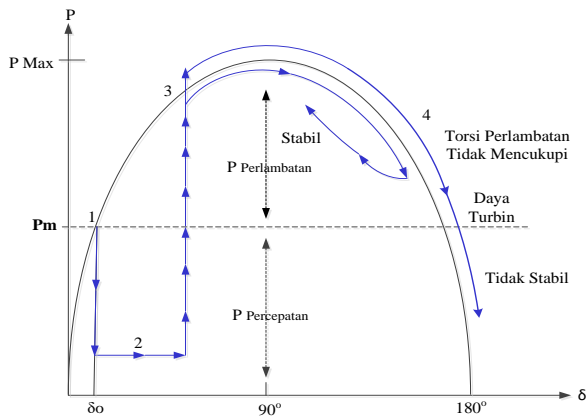
1. Gangguan besar pada kestabilan tegangan adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi tegangan yang stabil setelah mengalami gangguan besar seperti hilangnya pembangkit dari suatu sistem, lepasnya generator, dan hubung singkat (*short circuit*).
2. Gangguan kecil pada stabilitas tegangan adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi stabil setelah mengalami gangguan kecil seperti kenaikan pada beban.

2.2 Kestabilan Transien

Kestabilan transient adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi stabil setelah gangguan yang bersifat mendadak dengan kurung waktu satu *swing* yang pertama, dengan asumsi AVR (*Automatic Voltage Regulator*) dan governor belum bekerja. Penyebab gangguan stabilitas transient adalah hubung singkat (*short*

circuit), lepasnya generator dari sistem akibat beban lebih, perubahan beban secara tiba-tiba[1].

Analisis stabilitas transient digunakan untuk mengetahui, apakah sistem masih dalam kondisi stabil saat terjadi keadaan transient yaitu setelah terjadi gangguan besar yang bersifat mendadak. Gangguan besar yang dimaksud adalah hubung singkat pada saluran transmisi, perubahan beban secara mendadak, hilangnya beban dalam sistem distribusi, dan generator lepas.



Gambar 2.6 Kurva P vs δ generator saat gangguan[1]

Ilustrasi karakteristik respon generator saat terjadi gangguan dapat dilihat pada Gambar 2.6 terdapat empat titik yaitu :

- Titik 1 : Generator masih dalam keadaan stabil dan belum ada gangguan.
- Titik 2 : Keadaan saat terjadi gangguan yang menyebabkan daya output generator turun drastis. Rotor pada generator mengalami percepatan sehingga sudut rotor atau daya bertambah besar hal ini dikarenakan adanya selisih antara daya elektrik yang dihasilkan oleh generator dan daya *input* mekanik turbin.
- Titik 3 : Keadaan saat gangguan hilang, daya *output* generator akan kembali sesuai dengan harga sudut daya pada kurva P vs δ .

- Titik 4 : Keadaan setelah gangguan hilang, perlambatan pada rotor generator akibat daya output generator lebih besar dari pada daya mekanik turbin (*primover*).

Setelah gangguan hilang, apabila torsi lawan cukup untuk mengimbangi percepatan saat terjadi gangguan, maka generator akan stabil setelah periode pertama dan akan kembali ke titik kerjanya dalam kira-kira 0,5 detik. Sebaliknya apabila torsi lawan tidak mencukupi untuk mengimbangi percepatan maka sudut rotor atau daya akan terus bertambah membesar sehingga sudut rotor akan keluar dari sinkronisasi sistem.

2.3 Pemodelan pada Kestabilan Transient

2.3.1 Pemodelan pada Generator Sinkron[5]

Pemodelan klasik merupakan pemodelan yang paling sederhana karena diabaikannya rotor kutub menonjol pada generator sinkron dan tegangan konstan E' dengan reaktansi transient persen *direct axis* X'_d .

2.3.2 Pemodelan Beban[5]

Analisis stabilan terdapat tiga model beban sederhana yaitu impedansi konstan, arus konstan dan konstan kVA atau konstan power. Beban statis adalah penggambaran dari model dengan impedansi konstan dan model arus konstan digunakan sebagai penyearah yang dapat dikontrol. Model konstan KVA atau konstan power digunakan untuk menjaga daya saat nilai V atau I nya menurun. Misalnya mesin listrik pada industri kimia. Model arus konstan digunakan untuk menjaga nilai arus supaya selalu konstan.

2.4 Dinamika Rotor Dan Persamaan Ayuna[5]

Permasalahan mengenai kestabilan sangat berkaitan dengan prinsip dinamika rotor. Persamaan dinamika rotor adalah persamaan yang menggambarkan gerakan rotor mesin sinkron. Prinsip dasar dinamika menyatakan bahwa momen putar percepatan merupakan hasil kali momen kelembaban rotor dan percepatan sudutnya. Persamaan generator sinkron dapat dituliskan sebagai berikut :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.14)$$

Dimana :

J : Total momen kelembaban dari masa rotor (kg-m²)

θ_m : Pergeseran sudut rotor terhadap sumbu yang diam (Rad)

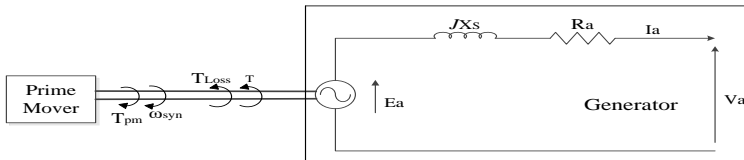
t : Waktu (detik)

T_a : Percepatan bersih mpada momen putar (N_m)

T_m : Poros penggerak yang diberikan *primover* (pengerak mula) yang dikurangi oleh momen putar perlambatan yang disebabkan oleh rugi-rugi putaran. T_m biasa disebut momen putar mekanis (N_m).

T_e : Momen putar listrik atau elektromagnetik (N_m)

Pada generator sinkron torsi mekanik (T_m) dan torsi listrik dianggap positif. Torsi mekanik (T_m) cenderung mempercepat arah putaran positif pada rotor θ_m . Untuk generator yang bekerja tetap maka $T_m = T_e$ dan $T_a = 0$ dalam hal ini percepatan sinkron karena tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor dari generator dan *prime mover*.



Gambar 2.7 Representasi rotor generator dengan arah rotasi dari torsi elektrik dengan torsi mekanik.

Pada persamaan 2.14 Pergeseran sudut rotor θ_m di ukur terhadap sumbu yang diam, hal ini berakibat kecepatan sinkron yang konstan. Generator *swing* akan dijadikan referensi untuk mengukur posisi terhadap sudut rotor terhadap referensi pada kecepatan sinkron, dengan persamaan sebagai berikut :

$$\theta_m = \omega_m t - \delta_m \quad (2.15)$$

Dimana :

$\omega_m t$: Kecepatan sinkron mesin (radian/ detik)

δ_m : Sudut pergeseran rotor (*machenical radians*) dari sumbu referensi putaran sinkron (derajat)

Jika Pergeseran sudut rotor θ_m diukur pada posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron, maka persamaannya sebagai berikut :

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.16)$$

Persamaan (2.14) dan (2.16) di dapatkan persamaan baru sebagai berikut

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17) dikalikan dengan ω_m maka didapatkan

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.18)$$

$J \omega_m$ adalah momen sudut rotor dan dinyatakan dalam simbol M, yang merupakan hubungan energi kinetik dengan massa yang berputar dengan persamaan sebagai berikut

$$W_k = \frac{1}{2} \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \quad (2.19)$$

Atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad (2.20)$$

Jika W_m tidak mengalami perubahan sebelum keidak-stabilan terjadi maka M terhadap kecepatan sinkron adalah :

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.21)$$

Hubungan persamaan ayunan dengan hubungan sudut, adalah :

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.22)$$

Hubungan sudut daya mekanik δ_m dengan sudut daya elektrik δ , jika P merupakan jumlah kutub pada generator sinkron maka persamaannya sebagai berikut :

$$\delta = \frac{P}{2} \delta_m \quad (2.23)$$

Hubungan sudut daya listrik dengan persamaan ayunan adalah

$$\frac{2}{P} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.24)$$

Persamaan (2.22) di substitusikan ke persamaan (2.24) setelah itu dibagi dengan daya dasar S_B , sehingga di dapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{2}{P} X \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} X \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B} \quad (2.25)$$

Konstanta H merupakan energi kinetik (MJ) pada kecepatan sinkron yang dibagi dengan rating motor (MVA), sehingga persamaan sebagai berikut:

$$H = \frac{W_k}{S_B} \quad (2.26)$$

Selanjutnya mensubstitusikan persamaan (2.26) ke dalam persamaan (2.25), sehingga didapatkan persamaan baru sebagai berikut :

$$\frac{2}{P} X \frac{2H}{\omega_{sm}} X \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.27)$$

Kecepatan putar mekanik berhubungan erat dengan kecepatan elektrik $w_{sm} = \frac{2}{p} w_o$, sehingga didapatkan persamaan

$$\frac{2H}{P} X \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.28)$$

Dalam elektrikl radian yang berhubungan dengan referensi putaran sinkron, posisi angular dari rotor δ dan nilai saat $t = 0$ adalah δ_0 .

$$\delta = \omega_r t - \omega_o t + \delta_0 \quad (2.29)$$

Persamaan (2.29) diturunkan terhadap waktu maka didapatkan persamaan baru sebagai berikut :

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0 = \Delta\omega_r \quad (2.30)$$

dan

$$\begin{aligned} \frac{d^2\delta}{dt^2} &= \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_r)}{dt} \\ &= \omega_0 \frac{d\varpi_r}{dt} = \omega_0 \frac{d(\Delta\varpi_r)}{dt} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Persamaan (2.28) disertakan komponen torsi redaman maka di dapatkan persamaan ayunan baru sebagai berikut :

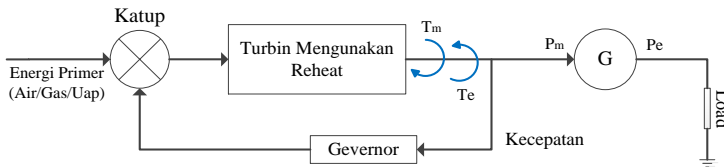
$$\frac{2H}{\omega_0} x \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e - K_D \Delta\varpi_r \quad (2.32)$$

2.5 Pengaturan Frekuensi

2.5.1 Governor

Governor merupakan unit pengatur frekuensi yang mengatur keluaran uap bertekanan untuk menggerakkan turbin uap yang berada dalam frekuensi tertentu. Fungsi dari governor adalah menjaga frekuensi sistem agar tetap konstan maka putaran generator juga harus konstan. Sehingga diperlukan pengaturan kecepatan governor (*speed governor*).

Frekuensi sistem berhubungan erat dengan daya aktif. Penyediaan daya aktif sistem harus dalam range yang diizinkan. Penyesuaian daya aktif ini bertujuan untuk mengatur putaran mekanik untuk memutar generator dengan cara pemberian bahan bakar turbin. Penambahan bahan bakar turbin dilakukan dengan membuka atau menutup katub. Governor akan mengurangi kapasitas bahan bakar ketika frekuensi naik dari nominalnya dan menambah kapasitas bahan bakar ketika frekuensi turun dari nominalnya.



Gambar 2.8 Blok Diagram *Speed Droop Governor*

Dimana :

T_m adalah Torsi mekanik P_m adalah Daya mekanik

T_e adalah Torsi elektrik P_e adalah Daya elektrik

Pada blok diagram *speed droop governor* menjelaskan perubahan beban saat terjadi perubahan torsi elektrik (T_e) pada generator pada saat bersamaan, sehingga terjadinya perbedaan antara torsi elektrik (T_e) dengan torsi mekanik (T_m) yang berakibat perbedaan kecepatan yang akan dirasakan pada governor.

2.5.2 Mode Operasi Governor

Mode operasi pada governor dibagi menjadi dua yaitu mode operasi *droop* dan mode operasi *isochronous*.

1. Mode Operasi *droop*

Pada mode *droop* governor sudah memiliki *setting point* (P_{mech}) atau biasa disebut daya mekanik yang besarnya sesuai dengan kebutuhan generator dan sesuai dengan rating generator. Output daya nilainya tetap sesuai dengan *set point* dan ketika terjadi perubahan beban tidak berpengaruh terhadap putaran turbin hal ini terjadi karena pengaruh *fixed setting*.

2. Mode operasi *isochronous*

Pada mode operasi *isochronous*, *set point* putaran governor ditentukan oleh kebutuhan daya listrik sekarang (*real time*). Prosesnya governor akan menyesuaikan *output* daya mekanik turbin agar nilainya sesuai dengan kebutuhan sistem. Hal ini, berdasarkan kontrol logic dari manufaktur. Saat terjadi perubahan beban maka, governor akan menentukan nilai *setting point* yang baru sesuai dengan kondisi beban sehingga

putaran frekuensi harus dalam *range* yang diizinkan agar generator tidak keluar dari batas stabil sistem.

2.6 Metode Mempertahankan Stabilitas Sistem Dari Gangguan

Mempertahankan stabilitas sistem tenaga listrik dari gangguan sangatlah penting agar sistem dalam kondisi seimbang atau stabil. Untuk itu da beberapa metode untuk mempertahankan kestabilan sistem.

2.6.1 Mengurangi Reaktansi Seri Pada Saluran

Pemasangan kapasitor seri pada saluran dapat mengurangi reaktansi seri. Pemasangan kapasitor seri ini dapat memperbesar daya yang disalurkan oleh generator. Pemasangan kapasitor seri efektif jika panjang saluran lebih dari 200 kilometer.

2.6.2 Load Shedding (Pelepasan Beban)

Pelepasan beban adalah memutuskan beban dari sumber yang dilakukan secara sengaja. Tujuannya mencegah penurunan frekuensi yang dapat membahayakan sistem. Misalnya, saat pelepasan pembangkit terbesar atau adanya penambahan yang melebihi kapasitas pembangkit. Penambahan tersebut mengakibatkan sistem tidak mampu menahan kapasitas beban yang tinggi, yang menyebabkan perlambatan pada penggerak mula (*prime mover*) yang terhubung pada generator. Perlambatan pada *prime mover* ini membuat frekuensi pada sistem turun, karena pembangkit tidak mampu memenuhi kebutuhan beban yang tinggi. Penurunan frekuensi ini dapat menyebabkan sistem *collapse*. Ada dua cara pelepasan beban yaitu :

1. Pelepasan beban secara manual

Pelepasan beban secara manual dilakukan saat kondisi tidak begitu mendesak. Contohnya saat melakukan *starting* motor besar atau penambahan beban yang melebihi suplai dari generator yang dapat membuat sistem tidak stabil sehingga sebelum melakukan penambahan beban atau *starting* motor besar harus dilakukan pelepasan beban supaya frekuensi dan tegangan tidak turun drastis. Kelebihan dari pelepasan beban secara manual adalah tidak membutuhkan biaya alat otomatis

yang mahal tetapi operator sistem harus handal dan sigap sehingga tidak merusak sistem

2. Pelepasan beban secara otomatis

Pelepasan beban secara otomatis yaitu memasang alat-alat yang dapat melindungi dengan cepat apabila terjadi perubahan frekuensi karena itu perlu pendeteksi rele saat frekuensi rendah *Under Frequency Relay* (UFR).

2.6.3 Menggunakan Pemutus Rangkaian Dengan Cepat (*High Speed Recloser*)

Semakin cepat gangguan di hilangkan maka stabilitas pada sistem kelistrikan dikatakan handal. Pada metode sama luas, sistem tenaga listrik dikatakan stabil setelah terjadi gangguan, jika luasan daerah peredam (A2) luasan lebih besar atau sama dengan luas daerah percepatan (A1). besarnya luasan masing-masing daerah ditentukan oleh waktu pemutusan saluran yang mengalami gangguan, sehingga dibutuhkan *High Speed Recloser* untuk menghilangkan gangguan pada sistem kelistrikan.

2.7 Gangguan Berpengaruh Terhadap Stabilitas Sistem

2.7.1 *Starting Motor*[5]

Starting motor berpengaruh terhadap stabilitas sistem karena ketika melakukan *starting* motor maka arus yang digunakan untuk *starting* 5 sampai 6 kali dari arus nominalnya, dan dapat menyebabkan terjadinya penurunan tegangan.

Stabilitas sistem akan terganggu jika terlalu sering melakukan *starting* motor karena dapat menyebabkan penurunan tegangan yang dapat memperpendek umur peralatan listrik dan penurunan tegangan apabila penurunan tegangan melebihi standart yang telah ditentukan.

2.7.2 *Hubung Singkat* (*Short Circuit*) [5]

Hubung singkat (*Short Circuit*) adalah jenis gangguan yang sering terjadi di sistem tenaga listrik. Saat terjadi hubung singkat terdapat arus yang mengalir menuju titik gangguan dan tegangan dapat menurun secara drastis di sekitar gangguan. Aliran arus yang besar pada titik gangguan berasal dari generator dan motor induksi. Hubung singkat

terjadi karena adanya sambaran petir, kegagalan osilasi, binatang atau ranting pohon.

2.7.3 Penambahan Beban Secara Tiba-Tiba[5]

Pada sistem tenaga listrik penambahan beban secara tiba-tiba dapat menyebabkan timbulnya gangguan peralihan apabila :

1. Pada kondisi tegangan atau reaktansi tertentu jumlah beban melebihi keadaan seimbang pada sistem tenaga listrik.
2. Saat menaikkan beban sampai terjadinya osilasi yang mengakibatkan ayunan sistem akan melewati batas kestabilan kritis dan tidak dapat ke kondisi stabil.

Saat melakukan penambahan beban secara tiba-tiba, arus yang mengalir akan semakin besar yang menyebabkan frekuensi turun dengan cepat. Penurunan frekuensi dapat berakibat sistem akan keluar dari sinkronisasinya meskipun beban belum menjangkau batas maksimum yaitu saat keadaan stabil atau mantap. Hal ini karena, daya keluaran generator yaitu daya elektrik melebihi daya masukan pada generator yaitu daya mekanis generator yang dihasilkan oleh *prime mover* atau penggerak mula. Kekurangan daya ini dapat di suplai dengan berkurangnya energi kinetik pada generator. Hal ini berakibat penurunan putaran generator dan penurunan frekuensi pada sistem yang menyebabkan sudut daya bertambah melebihi batas kritis generator sehingga generator lepas dari sistem dan hilangnya sinkronisasi sistem. Ketika dilakukan pembebanan pada rotor generator terjadi guncangan dan ayunan yang besar.

2.8 Auto Recloser[8]

Auto recloser adalah bagian dari sistem proteksi yang merupakan peralatan kontrol yang berfungsi memberikan perintah ke *circuit breaker* untuk dapat menutup kembali setelah berhasil memadamkan busur api dan setelah relay proteksi pengantar memberikan perintah buka pada *circuit breaker* akibat gangguan sementara di sistem transmisi.

Gangguan sementara biasanya terjadi di saluran ekstra tinggi dan tegangan tinggi, gangguan tersebut hilang setelah membuka *circuit breaker* di kedua sisi yang dapat mempertahankan stabilitas sistem atau

keseimbangan penyaluran daya selanjutnya, setelah gangguan hilang *circuit breaker* akan menutup dengan otomatis (*auto recloser*).

2.8.1 Jenis *Auto Recloser* Berdasarkan *Pole Tripping*

1. *Single Pole Auto Reclosing* (SPAR), bekerja ketika gangguan satu fasa ketanah
2. *Three Pole Auto Reclosing* (TPAR) , bekerja ketika gangguan tiga fasa ketanah

2.8.2 Waktu Penutupan Kembali (*Dead Time*)

Waktu penutupan kembali atau *dead time* adalah waktu jeda yang berfungsi untuk memberikan perintah penutupan kembali *circuit breaker* setelah gangguan dihilangkan. Lamanya waktu yang dibutuhkan untuk penutupan kembali dipengaruhi oleh :

1. Waktu minimal pemutusan untuk menghilangkan deionisasi udara dan busur api setelah *circuit breaker trip*
2. Waktu maksimal berdasarkan stabilitas sistem tenaga dalam menghilangkan busur api setelah *circuit breaker trip*

Tabel 2.1 Waktu De-ionisasi

Tegangan Sistem (kV)	Waktu De-ionisasi
66	0.25
150	0.30
275	0.37
500	0.50

Tabel 2.1 sebagai bahan pertimbangan maka batasan setting waktu jeda (*dead time*) adalah sebagai berikut :

1. Jenis pola *single pole auto reclosing* (SPAR) waktu *dead time* yang paling cepat sekitar 0.8 – 1.0 detik
2. Jenis pola *three pole auto reclosing* (TPAR) saat *high speed* waktu *dead time* sekitar 1.0-2.0 detik
3. Jenis pola *three pole auto reclosing* (TPAR) saat *low speed* waktu *dead time* sekitar 2.0-3.0 detik

2.9 Critical Clearing Time (CCT)

Critical Clearing Time (CCT) adalah waktu yang dibutuhkan generator untuk menghilangkan gangguan agar generator tetap dalam keadaan sinkron di sistem interkoneksi. Saat gangguan dihilangkan sebelum waktu kritis maka sistem dikatakan masih stabil sebaliknya apabila gangguan dihilangkan sesudah masa kritis maka sistem dikatakan tidak stabil dan dapat lepas dari sistem interkoneksi.

Pada gangguan tiga fasa saat gangguan mengakibatkan respon sudut rotor melebihi 90 *degree* atau pada kondisi transient melebihi 180 *degree* apabila gangguan tidak segera dihilangkan respon sudut rotor akan mengalami slip pole terus meningkat hingga kehilangan sinkronisasi dengan sistem. Jika respon sudut rotor tidak melampaui batas kestabilan 180 *degree* atau jika gangguan dapat segera dihilangkan, mungkin sistem masih tetap sinkron dengan syarat apabila respon sudut rotor menurun kurang dari 90 *degree*[7].

2.10 Standar yang Berkaitan dengan Stabilitas Transient

2.10.1 Standar *Critical Clearing Time*

Standart yang dipakai untuk *critical clearing time* berdasarkan standart SPLN No 52-1 Tahun 1983 sebagai berikut[11] :

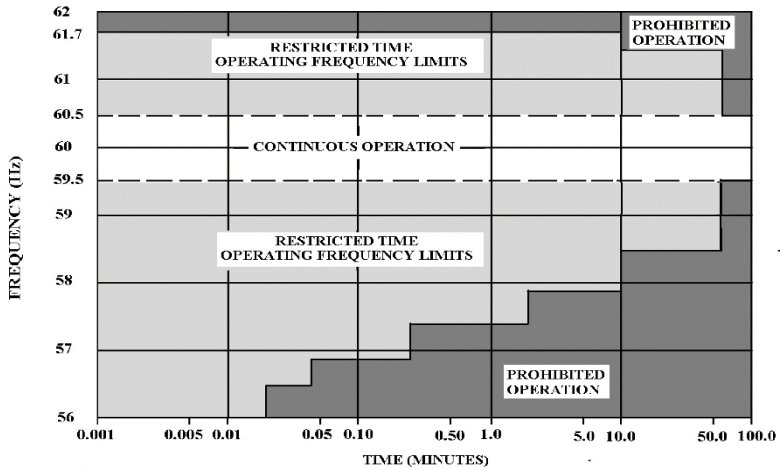
1. 70 kV *clearing time* \leq 150 mili detik
2. 150 kV *clearing time* \leq 120 mili detik
3. 275 kV *clearing time* \leq 100 mili detik
4. 500 kV *clearing time* \leq 90 mili detik
5. Pengaman cadangan terhadap gangguan untuk *clearing time* yaitu 500 mili detik.

2.10.2 Standar Frekuensi[9]

Standar yang digunakan untuk menentukan operasi frekuensi abnormal untuk *steam turbin* pada sistem tenaga menggunakan standar IEEE Std C37.106-2003 dengan frekuensi 60 Hz, tetapi pada tugas akhir ini menggunakan frekuensi 50Hz sehingga perlu mengubah standar menjadi bentuk persen (%) supaya dapat digunakan pada frekuensi 50 Hz.

Pada gambar 2.9 daerah *Continuous Operation* yaitu pada frekuensi antara 60.0 – 59.5 Hz adalah daerah operasi normal pada turbin uap. Maka akan dikonversikan dari 60 Hz ke 50 Hz sehingga 50 – 49.583

Hz. Pada daerah *prohibited operation* merupakan daerah terlarang frekuensi sistem sampai batas waktu tertentu. Sedangkan *restricted time operating frequency limits* adalah daerah frekuensi yang diizinkan oleh sistem namun hanya bersifat sementara yang artinya semakin besar frekuensi turun maka akan semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk frekuensi pada kondisi tersebut.



Gambar 2.9 Batas Standar Operasi Frekuensi Abnormal untuk *Steam Turbin*[9]

Tabel 2.2 Standar frekuensi 60 Hz Berdasarkan IEEE Std C37.106-2003 *Western Electric Coordinating Council (WECC)*

<i>Underfrequency limit</i>	<i>Overfrequency limit</i>	<i>Minimum time</i>
60.0 – 59.5 Hz	60.0 – 60.5 Hz	N/A (<i>continuous operating range</i>)
59.4 – 58.5 Hz	60.6 – 61.5 Hz	3 minutes
58.4 – 57.9 Hz	61.6 – 61.7 Hz	30 seconds
57.8 – 57.4 Hz		7.5 seconds
57.3 – 56.9 Hz		45 cycles
56.8 – 56.5 Hz		7.2 cycles
<i>Less than 56.4 Hz</i>	<i>Greater than 61.7 Hz</i>	<i>Instantaneous trip</i>

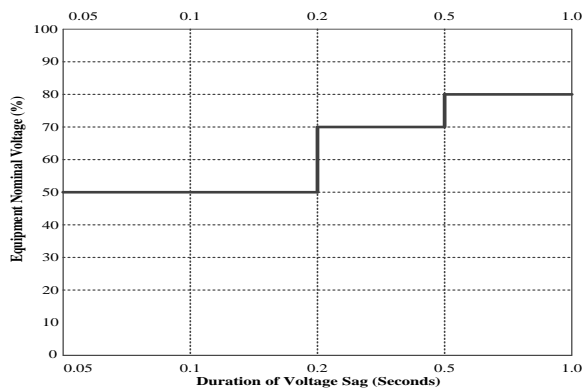
Dari tabel 2.2 dijelaskan bahwa untuk standar frekuensi 60 Hz terdapat durasi waktu yang diizinkan kenaikan dan penurunan frekuensi. tetapi pada tugas akhir ini menggunakan frekuensi 50 Hz sehingga perlu mengkonversi frekuensi 60 Hz menjadi 50 Hz dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Konversi dari standar frekuensi 60 Hz ke 50 Hz

<i>Underfrequency limit</i>	<i>Overfrequency limit</i>	Waktu Minimum
50 – 49.583 Hz	50 – 50.417 Hz	N/A (<i>continuous operating range</i>)
49.5 – 48.75 Hz	50.5 – 51.25 Hz	3 minutes
48.667 – 48.25 Hz	51.333 – 51.417 Hz	30 seconds
48.167 – 47.833 Hz		7.5 seconds
47.75 – 47.417 Hz		45 cycles
47.333 – 47.083 Hz		7.2 cycles
<i>Less than 47 Hz</i>	<i>Greater than 51.417 Hz</i>	<i>Instantaneous trip</i>

2.10.3 Standar Kedip Tegangan

Kedip Tegangan terjadi karena gangguan transien seperti terjadinya hubung singkat, perubahan beban, *starting* motor, pelepasan jaringan transmisi. Pada tugas akhir ini menggunakan standar tegangan kedip berdasarkan SEMI F47.



Gambar 2.10 Standar Kedip Tegangan[10]

Pada Gambar 2.9 Menjelaskan bahwa saat penurunan tegangan 50% sampai 70% dari tegangan nominalnya maka waktu kedip tegangan yang diperbolehkan selama 0,2 detik, saat penurunan tegangan 70% sampai 80% waktu yang diperbolehkan 0,5 detik dan untuk penurunan tegangan 80% waktu yang diizinkan selama 1 detik

Tabel 2.4 Standar Tegangan Kedip SEMI F47

VOLTAGE SAG DURATION				
Milliseconds (ms)	Seconds (s)	Cycles at 60 hz	Cycles at 50 hz	Percent (%) of Equipment Nominal Voltage
<50	<0.05	<3	<2.5	Not specified
50 to 200	0.05 to 0.2	3 to 12	2.5 to 10	50%
200 to 500	0.2 to 0.5	12 to 30	10 to 25	70%
500 to 1000	0.5 to 1.0	30 to 60	25 to 50	80%
>1000	>1.0	>60	>50	Not specified

2.10.4 Standar Tegangan

Tegangan harus dijaga agar tidak terjadi kenaikan atau penurunan tegangan yang menyebabkan hilangnya sinkronisasi sistem. Standar PLN untuk tegangan dapat dilihat pada Tabel 2.5

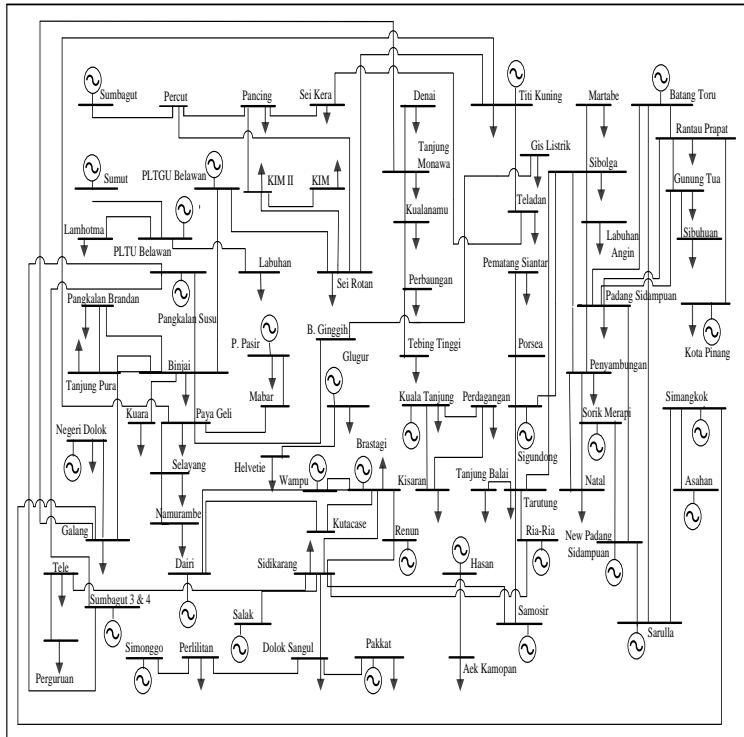
Tabel 2.5 Standar Tegangan PLN

Tegangan (kV)	Overvoltage	Undervoltage
20	+5%	-10%
70	+5%	-10%
150	+5%	-10%
500	+5%	-5%

Pada Tugas akhir ini akan dibahas sistem transmisi Sumatera Utara pada tahun 2023 meliputi :

1. Sistem Sumatera Utara tahun 2023 saat beban puncak (*Peak*)
2. Sistem Sumatera Utara tahun 2023 saat beban normal (*Normal*)

Pada gambar 3.2 adalah *single line diagram* sistem kelistrikan di Sumatera Utara.



Gambar 3.2 *Single line diagram* sistem kelistrikan di Sumatera Utara

3.2 Data Saluran Transmisi di Sumatera Utara

Data saluran transmisi sangat dibutuhkan saat akan merancang sistem Sumatera Utara yang dari tiap-tiap bus. Data dapat dilihat pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Data saluran transmisi Sumatera Utara tahun 2023

DARI BUS	KE BUS	R (Ohm)	X (Ohm)	Y (Siemen)	JARAK (km)
Kuala Tanjung	Kisaran	0.040328	0.129850	0.0000090	57.15
Percut	KIM II	0.023065	0.126160	0.0000093	2
Rantau Prapat	Gunung Tua	0.161718	0.411920	0.0000028	124.1
Gunung Tua	Padang Sidempuan	0.161718	0.411920	0.0000028	124.1
Belawan	Paya Pasir	0.022563	0.127433	0.0000093	6.2
Aek Kamopan	Rantau Prapat	0.040328	0.129865	0.0000090	50
Kisaran	Aek. Kanopan	0.040328	0.129865	0.0000090	50
Percut	Pancing	0.023065	0.126160	0.0000093	10
Tebing Tinggi	Kuala Tanjung	0.040328	0.129865	0.0000090	35.75
Perbaungan	Sei Rotan	0.161718	0.411920	0.0000028	36.51
Tebing Tinggi	Sei Rotan	0.161718	0.411920	0.0000028	53.49
Tanjung Manawa	Perbaungan	0.161718	0.411920	0.0000028	53.86
Denai	Tanjung Manawa	0.161718	0.411920	0.0000028	11.15
Denai	Sei Rotan	0.161718	0.411920	0.0000028	11.44
Sei Rotan	Tanjung Manawa	0.161718	0.411920	0.0000028	7.76
Sei Rotan	PLTGU Belawan	0.023065	0.126160	0.0000093	26.39
Labuhan Angin	Sibolga	0.040328	0.129850	0.0000090	28.8
Simonggo	Parlilitan	0.161718	0.411920	0.0000028	22
Pangkalan Brandan	Binjai	0.040328	0.129865	0.0000090	50.81
Sei Rotan	Percut	0.023065	0.126160	0.0000093	2
Percut	Sumbagut 1	0.034326	0.128550	0.0000091	23.72
Sei Rotan	Sumbagut 1	0.023065	0.126160	0.0000093	4

Tabel 3.1 Data saluran transmisi Sumatera Utara tahun 2023 (Lanjutan)

DARI BUS	KE BUS	R (Ohm)	X (Ohm)	Y (Siemen)	JARAK (km)
Sei Rotan	Tarutung	0.034326	0.128534	0.0000091	17.2
Sipaholon Ria- Ria	Tarutung	0.161718	0.411920	0.0000028	10.24
Paya Pasir	Mabar	0.034326	0.128550	0.0000091	5.93
Paya Pasir	Paya Geli	0.034326	0.128550	0.0000091	21.27
Binjai	Paya Geli	0.040328	0.129865	0.0000090	13.92
Glugur	Paya Geli	0.034326	0.128534	0.0000091	11.92
Paya Geli	Titi Kuning	0.137718	0.406700	0.0000028	30.47
Titi Kuning	Namurambe	0.137718	0.406700	0.0000028	12.44
Namurambe	Paya Geli	0.137718	0.406700	0.0000028	18.49
Gis Listrik	Titi Kuning	0.040328	0.129865	0.0000090	7.93
Titi Kuning	Brastagi	0.040328	0.129865	0.0000090	52.3
Sipaholon Ria- Ria	Sidikalang	0.161718	0.411920	0.0000028	12
Pematang Siantar	Porsea	0.040328	0.129865	0.0000090	72.48
Porsea	Tarutung	0.040328	0.129865	0.0000090	61.69
Sibolga	Tarutung	0.040328	0.129865	0.0000090	49.52
Salak	Sidikarang	0.040328	0.129850	0.0000090	15
Padang Sidampuan	Sibolga	0.040328	0.129865	0.0000090	70.78
Batu Gingsih	Paya Geli	0.040328	0.129850	0.0000090	10
Dolok Sanggul	Tarutung	0.161718	0.411920	0.0000028	63
Tarutung	Tele	0.161718	0.411920	0.0000028	81.54
Tele	Sidikarang	0.161718	0.411920	0.0000028	40.35
Brastagi	Sidikarang	0.161718	0.411920	0.0000028	63.98
Renun	Sidikarang	0.161718	0.411920	0.0000028	25.29
Brastagi	Renun 2	0.161718	0.411920	0.0000028	50.59

Tabel 3.1 Data saluran transmisi Sumatera Utara tahun 2023 (Lanjutan)

DARI BUS	KE BUS	R (Ohm)	X (Ohm)	Y (Siemen)	JARAK (km)
Gunung Para	Pematang Siantar	0.040328	0.129865	0.0000090	24
Labuhan	Belawan	0.161718	0.411920	0.0000028	2.95
Lamhotma	Labuhan	0.161718	0.411920	0.0000028	3.2
Perdagangan	Sumut 2	0.011621	0.094984	0.0000126	5
PLTGU Belawan	Binjai	0.023065	0.126160	0.0000093	34.47
Asahan 3	Simangkok	0.040328	0.129850	0.0000090	35
Simangkok	Porsea	0.040328	0.129865	0.0000090	2.32
Galang	Negeri Dolok	0.023065	0.126160	0.0000093	11
Tanah Jawa	Pematang Siantar	0.040328	0.129850	0.0000090	25
Perdagangan	Kuala Tanjung	0.040328	0.129865	0.0000090	32
Sipan 1	Sibolga	0.161718	0.411920	0.0000028	7.83
Sipan 2	Sibolga	0.161718	0.411920	0.0000028	7.83
Sipan 2	Sipan 1	0.161718	0.411920	0.0000028	7.83
Lamhotma	Paya Geli	0.161718	0.411920	0.0000028	6
Sumbagut 3 & 4	Galang	0.023065	0.126160	0.0000093	35
Kualanamu	Tanjung Monawa	0.040328	0.129865	0.0000090	13.92
Sei Rotan	KIM II	0.092064	0.396152	0.0000029	30
Pangkalan Brandan	Pangkalan Susu	0.040328	0.129865	0.0000090	10
Pangkalan Susu	Bnjai	0.023065	0.126175	0.0000093	69.9
Wampu	Brastagi	0.040328	0.129850	0.0000090	40
Brastagi	Dairi	0.161718	0.411920	0.0000028	75
Dairi	Kuta Cane (NAD)	0.161718	0.411920	0.0000028	105
Kuta Cane (NAD)	Brastagi	0.161718	0.411920	0.0000028	120
Sidikarang	Dolok Sangul	0.161718	0.411920	0.0000028	63

Tabel 3.1 Data saluran transmisi Sumatera Utara tahun 2023 (Lanjutan)

DARI BUS	KE BUS	R (Ohm)	X (Ohm)	Y (Siemen)	JARAK (km)
Parlilitan	Dolok Sangul	0.040328	0.129850	0.0000090	15
Dolok Snagul	Pakkat	0.040328	0.129850	0.0000090	35
Namurambe	Galang	0.023065	0.126175	0.0000093	48
Binjai	Galang	0.023065	0.126175	0.0000093	90
Galang	Tanjung Monawa	0.023065	0.126175	0.0000093	156
Simangkok	Galang	0.023065	0.126175	0.0000093	156
Sarulla	Simangkok	0.023065	0.126160	0.0000093	90
Sarulla	Rantau Prapat	0.023065	0.126175	0.0000093	98
New Padang Sidampuan	Padang Sidampuan	0.040328	0.129865	0.0000090	10
Penyambungan	New Padang Sidampuan	0.040328	0.129865	0.0000090	70
Hasan	Aek Kanopan	0.040328	0.129850	0.0000090	25
KIM	KIM II	0.092718	0.397289	0.0000029	5
KIM II	Sei Rotan	0.092718	0.397289	0.0000029	25
Panjing	KIM II	0.023085	0.120958	0.0000096	20
Sei Rotan	Denai	0.092718	0.397289	0.0000029	8
Sei Kera	Pancing	0.092718	0.397289	0.0000029	8
Panjing	Denai	0.092718	0.397289	0.0000029	8
Perbaungan	Kualanamu	0.040328	0.129865	0.0000090	10
Labuhan Bilik	Rantau Prapat	0.040328	0.129865	0.0000090	35
Sibuhuan	Padang Sidampuan	0.040328	0.129865	0.0000090	90
Kisaran	Tanjung Balai	0.040328	0.129865	0.0000090	20
Kisaran	Perdagangan	0.040328	0.129865	0.0000090	35
Selayang	Paya Geli	0.040328	0.129865	0.0000090	9
Namurambe	Selayang	0.040328	0.129865	0.0000090	9

Tabel 3.1 Data saluran transmisi Sumatera Utara tahun 2023 (Lanjutan)

DARI BUS	KE BUS	R (Ohm)	X (Ohm)	Y (Siemen)	JARAK (km)
Batu Gingsih	GIS Listrik	0.040328	0.129865	0.0000090	5
KIM	Mabar	0.034326	0.128550	0.0000091	23.72
Sei Kera	Teladan	0.034326	0.128550	0.0000091	6
Teladan	Titi Kuning	0.034326	0.128550	0.0000091	5
Paya Geli	Hervetia	0.034326	0.128550	0.0000091	5
Glugur	Helvetia	0.034326	0.128550	0.0000091	5
Sarulla	New Padang Sidampuan	0.023065	0.126175	0.0000093	71
Tele	Panguruan	0.040328	0.129865	0.0000090	25
Binjai	Kuala	0.040328	0.129865	0.0000090	9
Pangkalan Brandan	Tanjung Pura	0.040328	0.129865	0.0000090	25
Binjai	Tanjung Pura	0.040328	0.129865	0.0000090	25
Padang Sidampuan	Martabe	0.040328	0.129865	0.0000090	0.5
Sibolga	Martabe	0.040328	0.129865	0.0000090	0.5
Natal	Penyambungam	0.040328	0.129865	0.0000090	50
Sumbagut 3 & 4	Pangkalan Susu	0.023065	0.126175	0.0000093	80

3.3 Data Pembangkit dan Kapasitas Sumatera Utara tahun 2023

Pada Sistem kelistrikan Sumatera Utara tahun 2023 terdapat beban saat kondisi *peak* dan kondisi normal. Kondisi *peak* dan normal terdapat perbedaan kapasitas operasi generator, dapat dilihat pada tabel 3.2

Tabel 3.2 Data kapasitas pembangkit

No	BUS PEMBANGKIT	KAPASITAS	PEAK (MW)	NORMAL (MW)
1	PLTGU Belawan 1	150 MW	120	75

Tabel 3.2 Data kapasitas pembangkit (Lanjutan)

No	BUS PEMBANGKIT	KAPASITAS	PEAK (MW)	NORMAL (MW)
2	PLTGU Belawan 2	150 MW	120	75
3	PLTGU Belawan 3	150 MW	120	75
4	PLTGU Belawan 4	150 MW	120	75
5	PLTGU Belawan 5	150 MW	120	
6	PLTA Asahan 3	174 MW	121	87
7	PLTA Asahan 1-a	90 MW	63	45
8	PLTA Asahan 1-b	90 MW	63	
9	PLTA Batang Toru 1	127.5 MW	82	63
10	PLTA Batang Toru 2	127.5 MW	82	63
11	PLTA Batang Toru 3	127.5 MW	82	63
12	PLTA Batang Toru 4	127.5 MW	82	63
13	PLTA Hasang 1	40 MW	35	20
14	PLTA Inalum	90 MW	63	45
15	PLTA Renun-1	41 MW	24	20
16	PLTA Renun-2	41 MW	24	20
17	PLTA Sigundong-2	35 MW	24	17
18	PLTA Sigundong-4	75 MW	52	37
19	PLTA Simonggo 2	90 MW	50	45
20	PLTA Sipan-1	33 MW	23	16
21	PLTA Wampu	45 MW	31	8
22	PLTD Glugur	32.7 MW	17	16
23	PLTD Titi Kuning	24.84 MW	15	12

Tabel 3.2 Data kapasitas pembangkit (Lanjutan)

No	BUS PEMBANGKIT	KAPASITAS	PEAK (MW)	NORMAL (MW)
24	PLTG Paya Pasir	26.5 MW	18	13
25	PLTGU Sumbagut 1	250 MW	200	125
26	PLTGU Sumbagut 4	250 MW	200	100
27	PLTMH Dairi	43.5 MW	30	21
28	PLTMH Pakkat	29.8 MW	20	14
29	PLTMH Parlilitan	51.4 MW	35	25
30	PLTMH Salak	48 MW	33	24
31	PLTMH Tersebar II	32.2 MW	20	16
32	PLTMH Tanah Jawa	67.3 MW	40	33
33	PLTP Ria-Ria	20 MW	12	10
34	PLTP Sorik Merapi 1	240 MW	168	120
35	PLTP Sarulla 1	110 MW	70	55
36	PLTP Sarulla 2	110 MW	70	
37	PLTP Sibanyak	10 MW	6	5
38	PLTU Labuhan Angin-1	115 MW	80	57
39	PLTU Pangkalan Susu 1	220 MW	150	110
40	PLTU Pangkalan Susu 2	220 MW	150	110
41	PLTU Pangkalan Susu 3	200 MW	140	100
42	PLTU SUMUT 1-a	150 MW	105	75
43	PLTU SUMUT 1-b	150 MW	100	75
44	PLTU SUMUT 2-a	300 MW	210	150
45	Sumbagteng2	100 MW	70	50
46	Sumbagteng3	1000 MW	650	400

Tabel 3.2 Data kapasitas pembangkit (Lanjutan)

No	BUS PEMBANGKIT	KAPASITAS	PEAK (MW)	NORMAL (MW)
47	PLTU Belawan 1	55 MW	44	27
48	PLTU Belawan 2	55 MW	44	27
49	PLTU Belawan 3	55 MW	44	27

3.4 Data Pembebanan Sumatera Utara tahun 2023

Data pembebanan ini adalah beban pada Sumatera Utara tahun 2023 saat kondisi *peak* dan normal dari masing-masing gardu induk. Data pembebanan dapat dilihat pada tabel tabel 3.3

Tabel 3.3 Data beban per gardu induk

No	GARDU INDUK	PEAK (MW)	NORMAL (MW)
1	Glugur	100.83	106.76
2	Gis Listrik	145.74	77.15
3	Titi Kuning	130.83	103.89
4	Paya Pasir	80.28	28.33
5	Mabar	73.63	38.98
6	Kim	222.22	117.64
7	Labuhan	62.07	32.86
8	Lamhotma	66.16	10.01
9	Denai	100.94	71.25
10	Namurambe	92.08	65
11	Sei Rotan	121.16	91.9
12	Paya Geli	213.97	113.28
13	Binjai	89.25	63

Tabel 3.3 Data beban per gardu induk (Lanjutan)

No	GARDU INDUK	PEAK (MW)	NORMAL (MW)
14	Pangkalan Brandan	59.43	31.46
15	Perbaungan	48.86	51.73
16	Tanjung Morawa	101.88	71.92
17	Tebing Tinggi	85.96	60.25
18	Kuala Tanjung	50.59	53.56
19	Pematang Siantar	104.85	79.29
20	Gunung Paya	19.05	10.09
21	Kisaran	60.49	51.36
22	Aek Kanopan	27.91	11.48
23	Rantau Prapat	104.67	56.36
24	Kota Pinang	54.8	14.5
25	Brastagi	57.53	60.91
26	Sidikalang	18.25	19.32
27	Tele	1.05	1.11
28	Porsea	14.36	10.13
29	Tarutung	47.75	50.56
30	Sibolga	42.04	44.51
31	Padang Sidempuan	65.69	69.55
32	Gunung Tua	13.14	13.91
33	Labuhan Angin	4.36	4.62
34	Kualanamu	97.75	41.4
35	Dolok Sanggul	3.1	3.29
36	Parlilitan	0.45	0.48

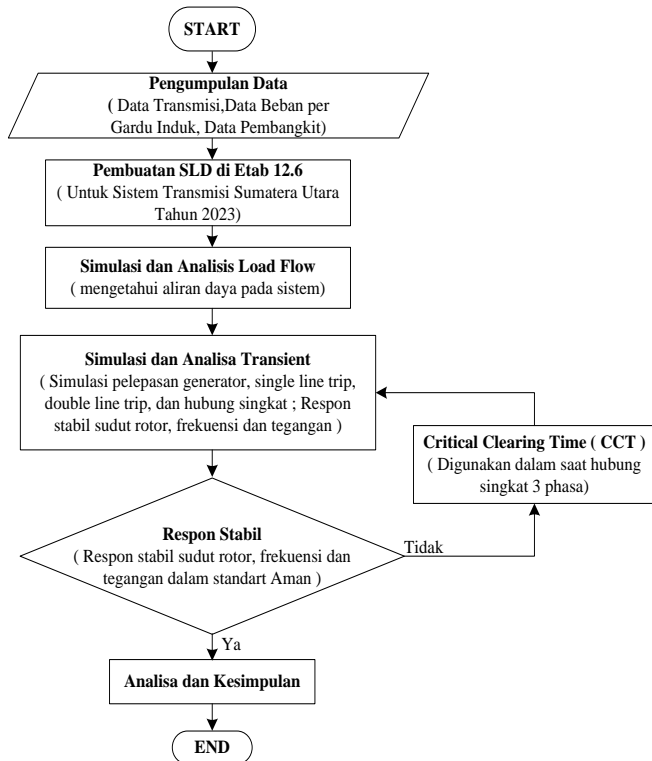
Tabel 3.3 Data beban per gardu induk (Lanjutan)

No	GARDU INDUK	PEAK (MW)	NORMAL (MW)
37	Salak	2.15	2.28
38	Negeri Dolok	4.24	4.49
39	Tanjung Pura	54.75	28.98
40	Pangururan	8.77	9.29
41	Labuhan Bilik	20.68	21.9
42	Kim II	115.95	122.78
43	Selayang	140.45	99.14
44	Pancing	160.38	90.57
45	Batu Gingging	212.52	94.75
46	Perdagangan	140.16	74.2
47	Galang	14.83	15.7
48	Tanjung Balai	84.48	59.63
49	Pakkat	4.56	4.83
50	Dairi	8.75	9.26
51	Sibuhuan	20.44	21.64
52	Sei Kera	119.36	84.25
53	Helvetia	151.94	107.25
54	Penyabungan	14	14.83
55	Martabe	6.72	1.78
56	Natal	6.76	1.79
57	Kuala	33.08	35.03
58	Teladan	212.93	112.73

3.5 Metodologi Simulasi

Metodologi bertujuan untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan simulasi. Tugas akhir ini melakukan simulasi Analisis stabilitas transient di Sumatera Utara tahun 2023. Langkah-langkah yang akan digunakan sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data
Data yang dikumpulkan data sistem kelistrikan Sumatera Utara tahun 2023 meliputi pembebanan tiap gardu induk, data penambahan pembangkit, dan data saluran transmisi
2. Pembuatan *Single Line Diagram* (SLD)
Pembuatan atau pemodelan *single line diagram* di Etap 12.6 dengan memasukkan data yang telah didapat dan disimulasikan.
3. Simulasi Aliran Daya
Sebelum melakukan Analisis stabilitas transient perlu mengalisa aliran daya terlebih dahulu agar sistem dalam keadaan stabil (tidak ada *under voltage* atau *over voltage* pada *single line diagram* di Etap 12.6).
4. Simulasi Analisis Stabilitas Transient
Simulasi Analisis stabilitas Transient meliputi pelepasan generator terbesar, pelepasan saluran, *single pole auto reclosing* karena adanya hubung singkat satu fasa ketanah dan yang terakhir adalah *Critical Clearing Time* (CCT) yaitu dengan menggunakan *metode time domain simulation*.
5. Penarikan Kesimpulan
Dengan adanya penambahan pembangkit 1.295MW diharapkan dapat memberikan kesimpulan dan Analisis dari hasil simulasi yang dilakukan.



Gambar 3.3 *Flow chart* Metodologi

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Analisis Stabilitas Transient pada Sistem Sumatera Utara Tahun 2023

Analisis stabilitas transient dilakukan setelah melakukan pemodelan *single line diagram* di Etap 12.6. Analisis kestabilan transient ini digunakan untuk mengetahui apakah sistem tetap stabil atau tidak ketika ada gangguan transient. Dalam tugas akhir ini terdapat 5 kasus yang akan dibahas, sebagai berikut :

1. Pelepasan Generator

Pada kasus pelepasan generator akan dilepas generator terbesar yang terhubung ke sistem dan generator lain dalam kondisi aktif. Percobaan dilakukan pada kondisi *peak* dan normal masing-masing dilakukan 3 kali percobaan. Selanjutnya akan di analisis stabilitas transient dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan.

2. Pelepasan Satu Saluran Dari Saluran Ganda Tanpa Ada Gangguan

Pada kasus ini akan dilakukan pelepasan satu saluran dari saluran ganda tanpa ada gangguan. Saluran yang dilepas adalah saluran yang memiliki aliran daya terbesar yang terhubung ke sistem. Selanjutnya akan di analisis stabilitas transient dengan mempertimbangkan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan pada kondisi beban *peak* dan normal masing-masing 3 kali percobaan.

3. Pelepasan Dua Saluran Dari Saluran Ganda Tanpa Adanya Gangguan

Pada kasus ini, akan dilakukan pelepasan dua saluran dari saluran ganda tanpa adanya gangguan. Saluran yang dilepas dari sistem adalah saluran yang memiliki aliran daya terbesar yang selanjutnya akan di Analisis stabilitas transient dengan mempertimbangkan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. percobaan yang dilakukan dalam kondisi *peak* dan normal masing-masing 3 kali percobaan.

4. *Single Pole Auto Reclosing*

Pada kasus ini, akan dilakukan pada bus yang memiliki gangguan satu fasa ketanah yang terbesar. Apabila kasus ini terdapat pada

saluran ganda maka satu saluran dari saluran ganda yang terkena gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah akan dilepas, selanjutnya dilakukan penutupan saluran kembali sehingga dapat diAnalisis stabilitas transient dengan mempertimbangkan respon stabil sistem yaitu sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Percobaan yang dilakukan dalam kasus ini dalam kondisi beban *peak* dan normal masing-masing 3 kali percobaan .

5. *Critical Clearing Time (CCT)*

Pada kasus ini, percobaan yang dilakukan adalah saat hubung singkat 3 fasa yang nilai hubung singkatnya terbesar. Gangguan hubung singkat 3 fasa terdapat pada saluran dan dicari waktu pemutusan kritisnya yaitu nilai diantara kondisi stabil dan tidak stabil pada sistem. Simulasi dilakukan pada kondisi beban *peak* dan normal, masing-masing tiga kali percobaan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor dan frekuensi.

Untuk memudahkan memahami *study* kasus yang akan dibahas dalam tugas akhir ini, dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1 *Study* kasus stabilitas transient di Sumatera Utara

Kasus 1	Kondisi	Pembangkit	Kapasitas (MW)	Pembangkitan (MW)
<i>Gen Out</i>	<i>Peak</i>	Sumut 2a	300	210
	Normal			150
	<i>Peak</i>	PLTGU Sumbagut 4	250	200
	Normal	PLTGU Sumbagut 1	250	100
	<i>Peak</i>	PLTA ASAHAN 3	174	121
	Normal			87
Kasus 2	Kondisi	Saluran	Aliran Daya (MW)	
<i>Trip 1 Saluran</i>	<i>Peak</i>	Binjai - Paya Geli	462.2986	
	Normal	P.Susu - P. Brandan	383.9712	
	<i>Peak</i>	P. Susu- P.Brandan	441.18	
	Normal	Binjai - Paya Geli	335.3996	
	<i>Peak</i>	Sei Rotan- PLTGU Belawan	367.0828	
	Normal	Sei Rotan - Percut	213.108	

Tabel 4.1 *Study kasus stabilitas transient di Sumatera Utara (Lanjutan)*

Kasus 3	Kondisi	Saluran	Aliran Daya (MW)			
Trip 2 Saluran	Peak	Binjai - Paya Geli	462.2986			
	Normal	P.Susu - P. Brandan	383.9712			
	Peak	P. Susu - P.Brandan	441.18			
	Normal	Binjai - Paya Geli	335.3996			
	Peak	Sei Rotan - PLTGU Belawan	367.0828			
	Normal	Sei Rotan - Percut	213.108			
Kasus 4	Kondisi	Saluran	CB <i>Open</i> (detik)	CB <i>Reclose</i> (detik)		
Single Pole Auto Reclosing Time	Peak	Sei Rotan - Percut	0.2	0.9		
	Normal	Sei Rotan - Percut	0.2	0.9		
	Peak	Sei Rotan - PLTGU Belawan	0.2	0.9		
	Normal	Sei Rotan - PLTGU Belawan	0.2	0.9		
	Peak	Paya Pasir - Belawan	0.2	0.9		
	Normal	PLTGU KIM - Percut	0.2	0.9		
Kasus 5	Kondisi	Saluran	CCT, CB <i>Open</i> (detik)			
			Sudut Rotor		Frekuensi	
			Stabil	Tidak Stabil	Aman	Tidak Aman
Critical Clearing Time (CCT)	Peak	Sei Rotan-Percut	0.300	0.301		
		Binjai-Paya Geli	0.321	0.322		
		Titi Kuning-Sei Rotan	0.343	0.344		
	Normal	Sei Rotan-Percut	0.625	0.626		
		Binjai-Paya Geli	0.799	0.800	0.796	0.797
		KIM-Percut	0.710	0.711		

Untuk menentukan lokasi pada *study* kasus membutuhkan beberapa data diantaranya data aliran daya, hubung singkat 1 fasa ketanah dan tiga fasa .Data *study* kasus dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.2 Aliran daya saat beban *peak*

Saluran	Aliran Daya (MW)
Binjai - Paya Geli	462.299
Pangkalan Susu – Pangkalan Brandan	441.180
Sei Rotan - PLTGU Belawan	367.083
Sei Rotan - Percut	333.558
Percut - Kim II	322.017

Tabel 4.3 Aliran daya saat beban normal

Saluran	Aliran Daya (MW)
Pangkalan Susu – Pangkalan Brandan	383.971
Binjai - Paya Geli	335.400
Sei Rotan - Percut	367.083
Sei Rotan - PLTGU Belawan	333.558
PLTU Belawan - Paya pasir	322.017

Tabel 4.4 Hubung Singkat 1 fasa ke tanah saat beban *peak*

Bus	Isc 1 fasa ke tanah (kA)
Sei Rotan	41.453
PLTGU Belawan	38.902
Percut	37.487
Paya Pasir	31.864
KIM II	31.722
Titi Kuning	30.886
Belawan	30.533

Tabel 4.5 Hubung Singkat 1 fasa ke tanah saat beban normal

Bus	Isc 1 fasa ke tanah (kA)
Sei Rotan	39.004
Percut	35.954
PLTGU Belawan	33.744
KIM	30.651
PLTU Belawan	29.741
Paya Pasir	28.715
Sumbagut 1	28.164

Tabel 4.6 Hubung Singkat 3 fasa saat beban *peak*

Bus	Isc 3 fasa (kA)
Sei Rotan	87.697
Percut	79.555
Paya Geli	74.306
Titi Kuning	72.895
KIM II	71.504
Teladan	60.773
Paya Pasir	60.199

Tabel 4.7 Hubung Singkat 3 fasa beban normal

Bus	Isc 3 fasa (kA)
Sei Rotan	87.899
Percut	80.879
Paya Geli	74.158
KIM	72.940
Titi Kuning	72.553
Paya Pasir	61.030
Pancing	59.707

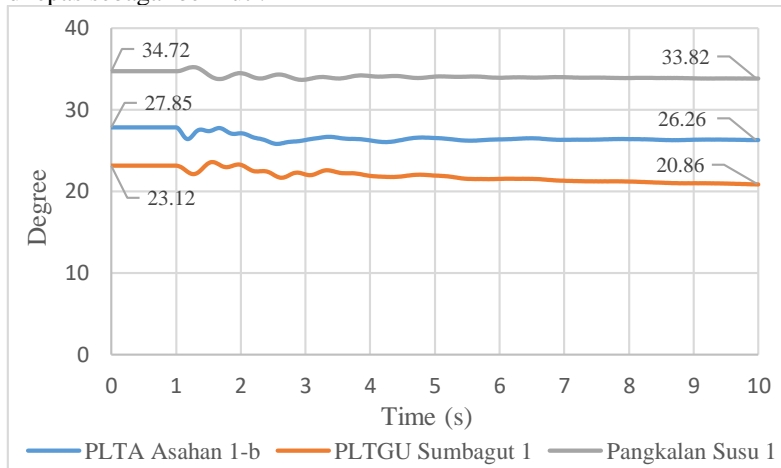
4.2 Pelepasan Generator

Study kasus pelepasan generator yaitu generator yang terbesar yang terhubung di sistem Sumatera Utara. kondisi yang diamati yaitu saat beban *peak* dan normal, masing-masing 3 kali percobaan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan.

4.2.1 Kondisi Beban *Peak* (Generator PLTU Sumut 2a, *Delete* ($t = 1s$))

Pada *study* kasus pelepasan generator total kapasitas generator aktif sebesar 7302.24 MW dan daya yang dibangkitkan sebesar 4267.591 MW dengan kebutuhan beban sebesar 4121.02 MW ketika generator PLTU Sumut 2a yang memiliki kapasitas 300 MW dan daya yang dibangkitkan sebesar 210 MW akan dilepas saat ($t=1s$), sedangkan pembangkit lain masih aktif sehingga sistem kehilangan daya sebesar 210 MW atau 5% dari total daya

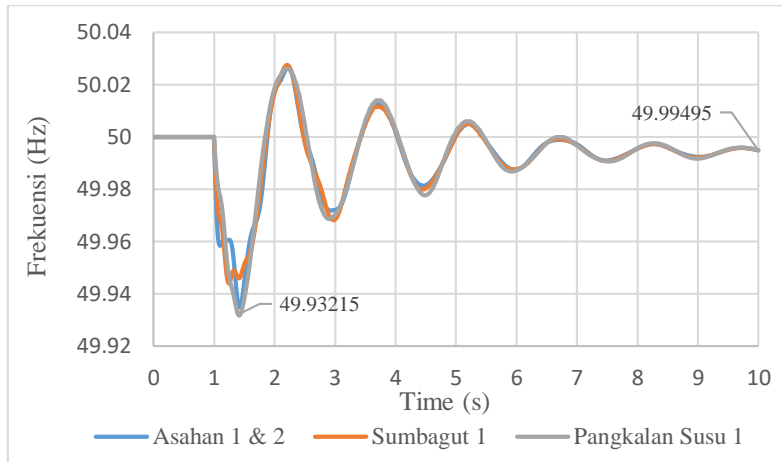
yang dibangkitkan. Hasil Simulasi ketika PLTU Sumut 2a dilepas sebagai berikut :



Gambar 4.1 Respon sudut rotor saat generator Sumut 2a,*delete* ($t=1s$)

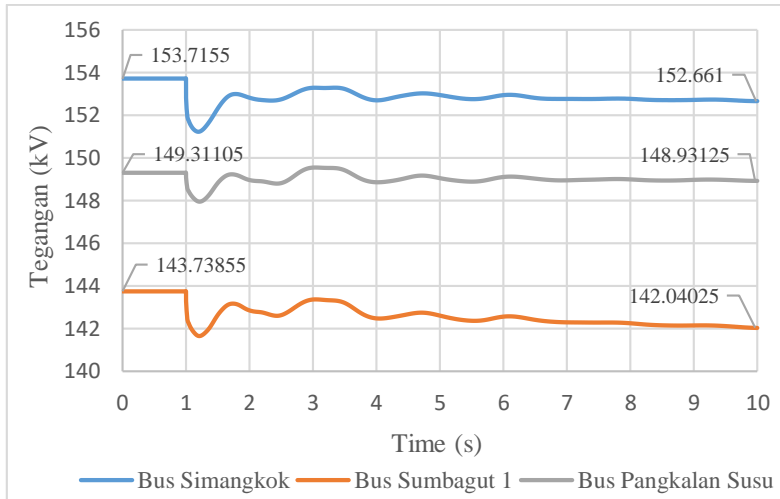
Pada gambar 4.1 dapat dilihat saat generator sumut 2a mengalami osilasi dengan ayunan kecil sehingga sistem masih kembali ke kondisi *steady state* sistem. Pada respon generator PLTA Asahan 1-b nilai awal 27.85 *degree* dan kembali ke kondisi *steady state* pada nilai 26.26 *degree*. Generator PLTGU Sumbagut 1 nilai 23.12 *degree* menjadi 20.86 *degree* dan generator Pangkalan Susu nilai awal 34.72 *degree* dan

steady state menjadi 33.82 *degree*. Pengaruh perubahan sudut rotor dikarenakan damping, inersia dan pembebanan generator karena ketika generator memiliki inersia dan damping yang besar akan cenderung lebih stabil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, ketika generator Sumut 2a dilepas dari sistem sudut rotor masih dalam keadaan stabil.



Gambar 4.2 Respon frekuensi saat generator Sumut 2a, *delete* (t=1s)

Pada gambar 4.2 dapat dilihat ketika generator Sumut 2a dilepas maka pada generator Pangkalan Susu 1 mengalami penurunan frekuensi sebesar 49.932 Hz pada detik ke 1.401 hingga mencapai kondisi *steady state* pada detik ke-10 dengan frekuensi 49.994 Hz. Berdasarkan standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 range aman frekuensi *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz. Hilangnya daya sebesar 210 MW menyebabkan turunnya frekuensi sesaat tetapi masih dalam kondisi stabil karena memiliki cadangan daya aktif yang cukup saat PLTU Sumut 2a dilepas dari sistem.

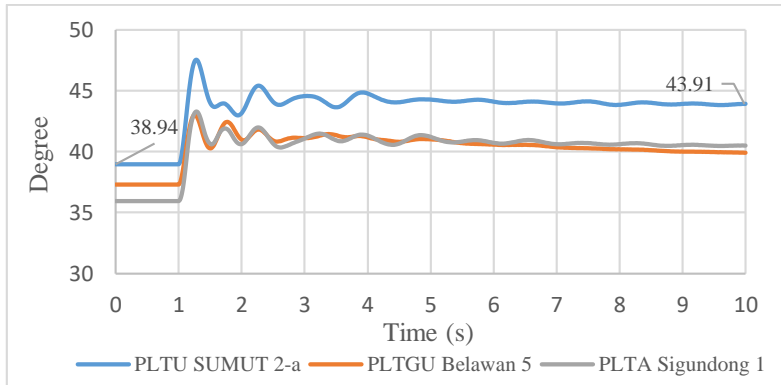


Gambar 4.3 Respon tegangan saat generator Sumut 2a, *delete* ($t=1s$)

Pada gambar 4.3 dapat dilihat ketika generator Sumut 2a dilepas maka terjadi fluktuasi tegangan pada bus Simangkok nilai awal simulasi 153.7 kV mengalami penurunan menjadi 152.6 kV, bus Sumbagut 1 mengalami penurunan dari 143.7 kV menjadi 142.04 kV dan bus Pangkalan Susu mengalami penurunan dari 149.3 kV menjadi 148.9 kV. Penurunan tegangan tidak terlalu besar dan masih dalam range stabil standar PLN 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

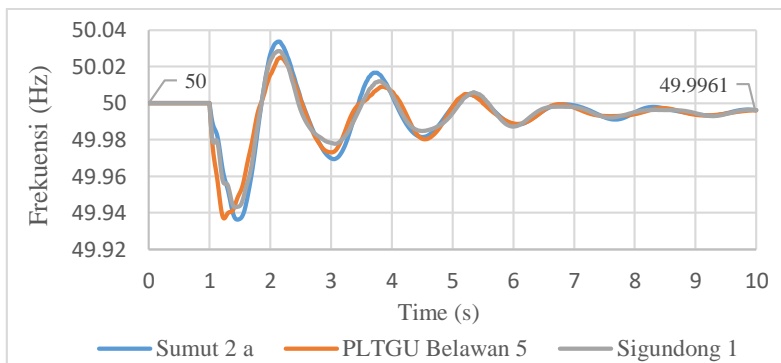
4.2.2 Kondisi Beban Peak (Generator PLTGU Sumbagut 4, *Delete* ($t=1s$))

Pada *study* kasus pelepasan generator, total kapasitas generator aktif sebesar 7302.24 MW dan daya yang dibangkitkan generator 4267.591 MW dengan kebutuhan beban sebesar 4121.02 MW. Saat PLTGU Sumbagut 4 *delete* ($t = 1s$), maka sistem akan kehilangan daya *supply* PLTGU Sumbagut 4 dengan kapasitas 250 MW daya yang dibangkitkan sebesar 200 MW atau 4.686% dari total daya yang dibangkitkan. Hasil Simulasi ketika PLTGU Sumbagut 4 dilepas sebagai berikut :



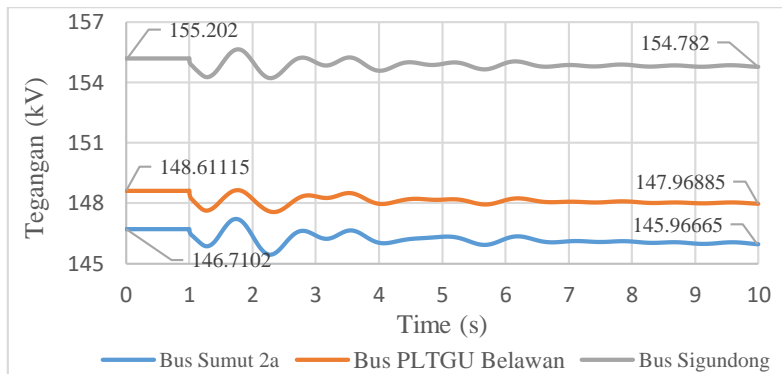
Gambar 4.4 Respon sudut rotor saat generator PLTGU Sumbagut 4, *delete* ($t=1s$)

Pada gambar 4.4 respon sudut rotor PLTGU Sumbagut 4 dilepas dari sistem, maka terjadi osilasi dengan ayunan yang kecil sehingga sistem dapat kembali ke kondisi *steady state*-nya. Seperti pada respon sudut rotor generator PLTU Sumut 2a nilai awal simulasi 38.94 *degree* dan kembali *steady state* pada nilai 43.91 *degree*. Perubahan nilai sudut rotor ini disebabkan karena perubahan pembebanan generator, inersia dan damping. Apabila sistem memiliki inersia dan damping besar maka sistem cenderung lebih stabil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sudut rotor masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.5 Respon frekuensi saat generator PLTGU Sumbagut 4, *delete* ($t=1s$)

Pada gambar 4.5 dapat dilihat ketika generator PLTGU Sumbagut 4 dilepas, respon frekuensi pada PLTGU Belawan 5 mengalami penurunan hingga mencapai 49.93 Hz pada detik ke 1.241 dan kembali ke kondisi *steady state* pada detik ke-10 dengan nilai 49.996 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam kondisi stabil berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 range aman frekuensi *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

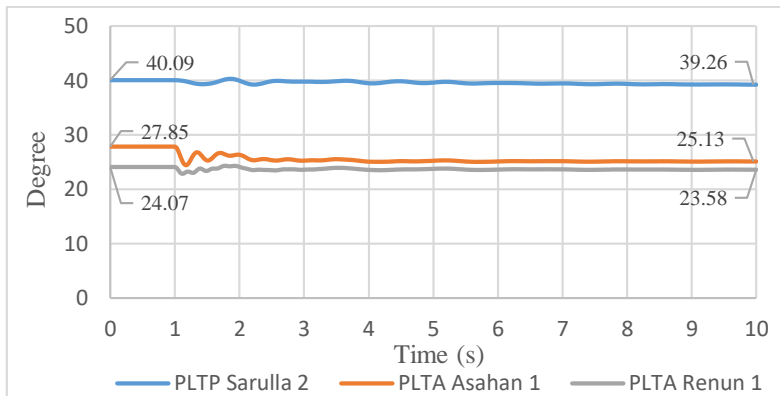


Gambar 4.6 Respon Tegangan saat generator PLTGU Sumbagut 4, *delete* (t=1s)

Pada gambar 4.6 dapat dilihat ketika generator PLTGU Sumbagut 4 di lepas dari sistem, maka respon tegangan terjadi penurunan yaitu pada bus Sumut 2a tegangan awalnya nilai-nya 146.7 kV menjadi 145.9 kV. Pada bus PLTGU Belawan tegangan awal 148.6 kV menjadi 147.9 kV dan pada bus Sigundong tegangan awal 155.2 kV menjadi 154.7 kV. Sehingga dapat disimpulkan sistem masih stabil dikarenakan masih dalam range stabil standar PLN -10% dan +5% yaitu 135 kV – 157.5 kV.

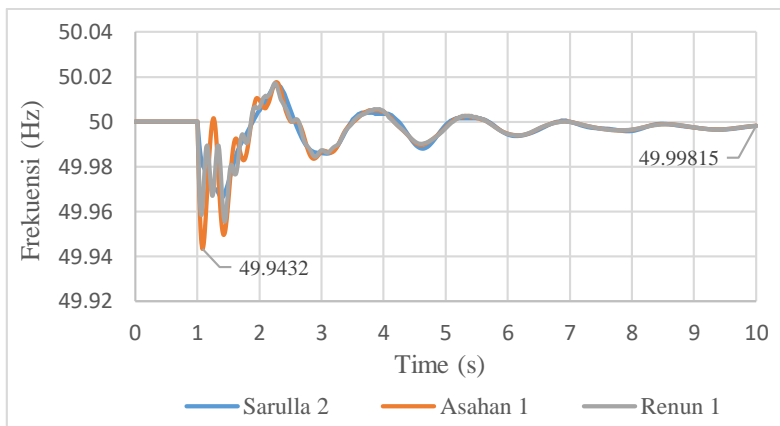
4.2.3 Kondisi Beban *Peak* (Generator PLTA Asahan 3, *Delete* (t = 1s))

Pada *study* kasus generator lepas total kapasitas generator aktif sebesar 7302.24 MW dan daya yang dibangkitkan sebesar 4267.591 MW dengan kebutuhan beban sebesar 4121.02 MW. Saat PLTA Asahan 3 dilepas sistem akan kehilangan daya *supply* dengan kapasitas pembangkit 174 MW dan daya yang dibangkitkan sebesar 121 MW atau 2.835% dari total daya yang dibangkitkan. Hasil Simulasi menunjukkan ketika generator PLTA Asahan 3 dilepas sebagai berikut :



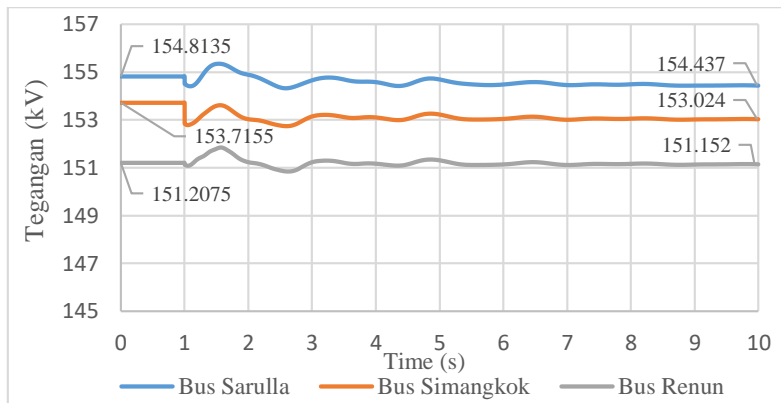
Gambar 4.7 Respon sudut rotor saat generator PLTA Asahan 3,delete (t=1s)

Pada gambar 4.7 respon sudut rotor saat PLTA Asahan 3 dilepas saat $t = 1s$ maka terjadi osilasi dengan ayunan yang kecil sehingga sistem masih bisa kembali ke kondisi *steady state*-nya. Pada PLTP Sarulla 2 respon sudut rotor mengalami osilasi tetapi kecil dengan awal simulasi mencapai 40.09 degree dan *steady state* pada nilai 39.26 degree. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sudut rotor masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.8 Respon frekuensi saat generator PLTA Asahan 3,delete (t=1s)

Pada gambar 4.8 saat generator PLTA Asahan 3 dilepas dari sistem maka respon frekuensi mengalami penurunan saat detik ke 1.081 sebesar 49.94 Hz dan kembali *steady state* pada detik ke-10 sebesar 49.99 Hz, begitu pula dengan Sarulla 2 dan Renun 1 mengalami osilasi dan dapat kembali *steady state* 49.99 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi stabil berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 range aman frekuensi *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.



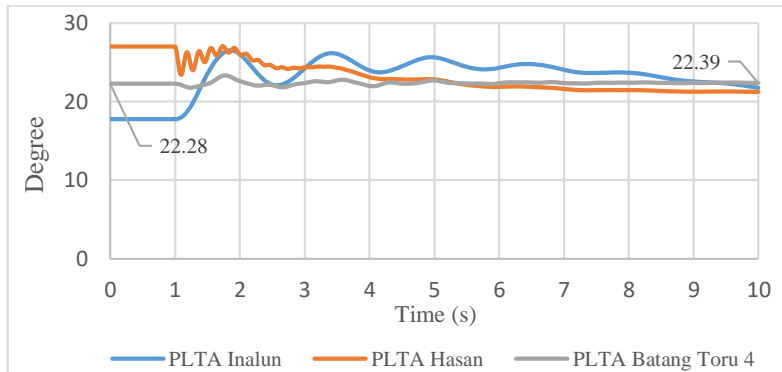
Gambar 4.9 Respon tegangan saat generator PLTA Asahan 3 *delete* ($t=1s$)

Pada gambar 4.9 dapat dilihat ketika generator PLTA Asahan 3 dilepas maka respon tegangan terjadi fluktuasi yang tidak terlalu besar sehingga dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada bus Sarulla terjadi penurunan tegangan dari 154.8 kV dan *steady state* pada 154.4 kV. Pada bus Simangkok penurunan mencapai 153.7 kV dan *steady state* pada tegangan 153.02 kV. Pada bus Renun penurunan tegangan nya 151.2 kV dan *steady state* pada 151.1 kV. Sehingga dapat di simpulkan bahwa, tegangan masih dalam kondisi stabil PLN -10% dan +5% yaitu 135 kV – 157.5 kV.

4.2.4 Kondisi Beban Normal (Generator PLTU Sumut 2a, *Delete* ($t=1s$))

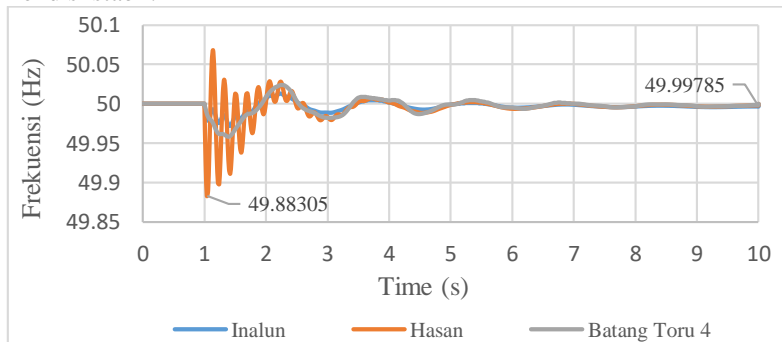
Pada kondisi beban normal, total kapasitas generator aktif sebesar 7302.24 MW dan daya yang dioperasikan sebesar 3026 MW dengan kebutuhan beban 2748.94 MW. Pada *study* kasus pelepasan generator PLTU Sumut 2a detik ke-1 sistem akan kehilangan daya *supply* dengan

kapasitas sebesar 300 MW dengan daya yang dibangkitkan sebesar 150 MW atau 5 % dari total daya yang dibangkitkan. Berikut ini, hasil simulasi ketika generator PLTU Sumut 2a di lepas dari sistem Sumatera Utara :



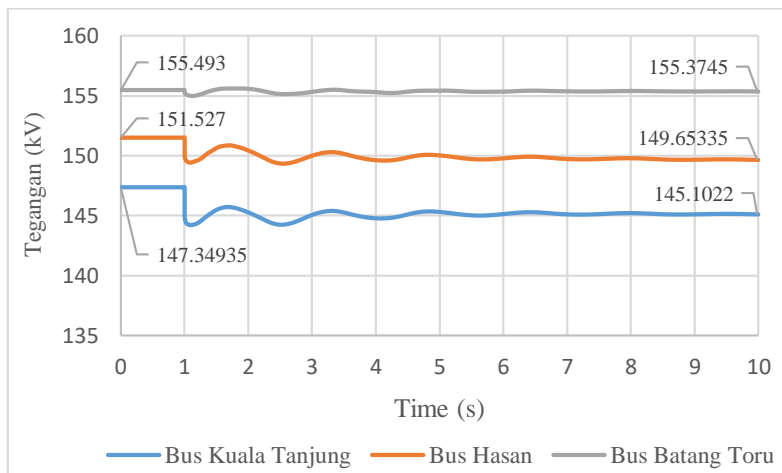
Gambar 4.10 Respon sudut rotor saat generator PLTU Sumut 2a, *delete* ($t=1s$)

Pada gambar 4.10 respon sudut rotor saat generator PLTU Sumut 2a dilepas, terjadi osilasi dengan ayunan yang kecil sehingga sistem masih bisa kembali ke kondisi *steady state* nya. Pada PLTA Bt. Toru 4 dengan awal simulasi 22.28 *degree* dan kondisi *steady state* 22.39 *degree*. Begitu pula dengan PLTA Hasan dan PLTA Inalun. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut saat PLTU Sumut 2a dilepas masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.11 Respon frekuensi saat generator PLTU Sumut 2a, *delete* ($t=1s$)

Pada gambar 4.11 dapat dilihat, ketika generator PLTU Sumut 2a dilepas terjadi penurunan frekuensi tetapi dapat kembali stabil. Hasan mengalami penurunan terbesar pada detik ke 1.401 mencapai 49.88 Hz dan dapat kembali *steady state* pada pada detik ke-10 dengan frekuensi 49.99 Hz begitu pula dengan Inalun dan Hasan. Turunnya frekuensi diakibatkan adanya daya yang hilang sebesar 150 MW tetapi masih stabil karena memiliki cadangan daya aktif yang cukup saat PLTU Sumut 2a dilepas dari sistem. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam kondisi stabil berdasarkan standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 range aman frekuensi *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

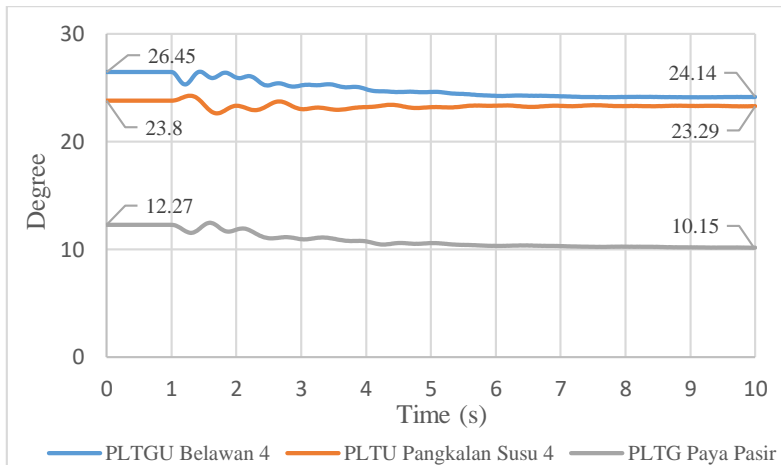


Gambar 4.12 Respon tegangan saat generator PLTU Sumut 2a, *delete* (t=1s)

Pada gambar 4.12 dapat dilihat ketika generator Sumut 2a dilepas dari sistem maka terjadi fluktuasi tegangan pada semua bus. Pada bus Kuala Tanjung mengalami penurunan tegangan dari 147.3 kV menjadi 145.1 kV. Pada bus Hasan mengalami penurunan tegangan dari 151.5 kV menjadi 149.6 kV. Dan pada bus Batang Toru mengalami penurunan tegangan dari 155.4 kV menjadi 155.3 kV. Jadi, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan stabil karena penurunan tegangan yang terjadi tidak terlalu besar sehingga masih dalam range stabil standar PLN untuk tegangan 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

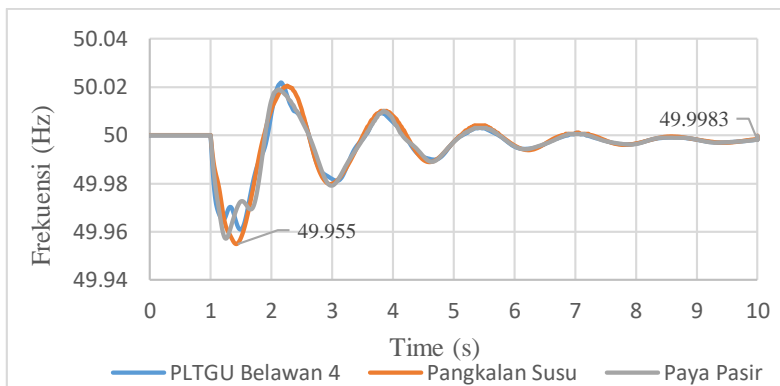
4.2.4 Kondisi Beban Normal (Generator PLTGU Sumbagut 1, Delete ($t=1$ s))

Pada kondisi beban normal, total kapasitas generator aktif sebesar 7302.24 MW dan daya yang dibangkitkan sebesar 3026 MW saat $t = 1$ s, sistem akan kehilangan daya *supply* pada generator PLTGU Sumbagut 1 dengan kapasitas 250 MW sedangkan daya yang dibangkitkan generator sebesar 125 MW atau 4.1% dari daya total yang dibangkitkan. Berikut ini, hasil simulasi ketika generator PLTGU Sumbagut 1 di lepas dari sistem Sumatera Utara :



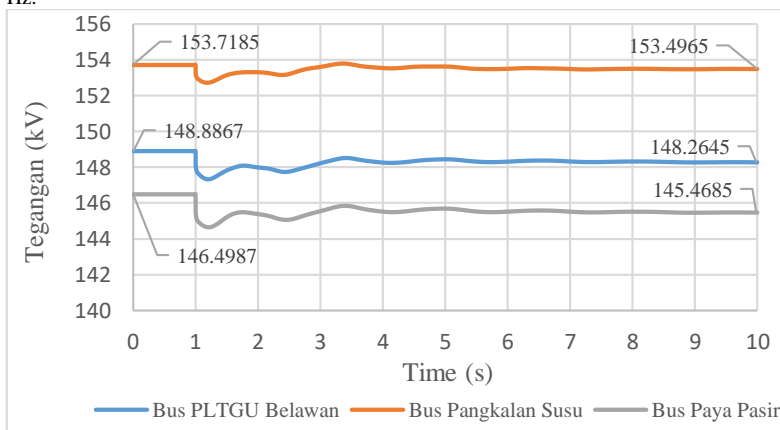
Gambar 4.13 Respon sudut rotor saat generator PLTGU Sumbagut 1, delete ($t=1$ s)

Pada gambar 4.13 dapat dilihat respon sudut rotor saat PLTGU Sumbagut 1 dilepas dari sistem Sumatera Utara, maka terjadi osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga sistem dapat kembali ke kondisi *steady state* nya. Respon sudut rotor pada generator PLTGU Belawan 4 pada detik ke-0 sebesar 26.45 degree dan *steady state* 24.14 degree. respon sudut rotor PLTU Pangkalan Susu pada detik ke-10 sebesar 23.8 degree dan *steady state* 23.29 degree. Sedangankan PLTG Paya Pasir pada detik ke-0 sebesar 12.27 degree dan *steady state* 10.16 degree. Perubahan respon sudut rotor ini disebabkan karena hilangnya *supply* generator secara tiba-tiba, inersia dan damping. Apabila generator memiliki inersia dan damping besar maka sistem cenderung lebih stabil. Sehingga, dapat disimpulkan respon sudut rotor dalam kondisi stabil.



Gambar 4.14 Respon frekuensi saat generator PLTGU Sumbagut 1,delete ($t=1s$)

Pada gambar 4.14, ketika generator Sumbagut 1 dilepas dari sistem, terjadi penurunan frekuensi sebesar 49.95 Hz pada Pangkalan Susu dan dapat kembali ke kondisi *steady state* pada detik ke-10 sebesar 49.99 Hz, begitu pula dengan respon frekuensi Paya Pasir dan PLTGU Belawan 4 respon frekuensi *steady state* 49.99 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

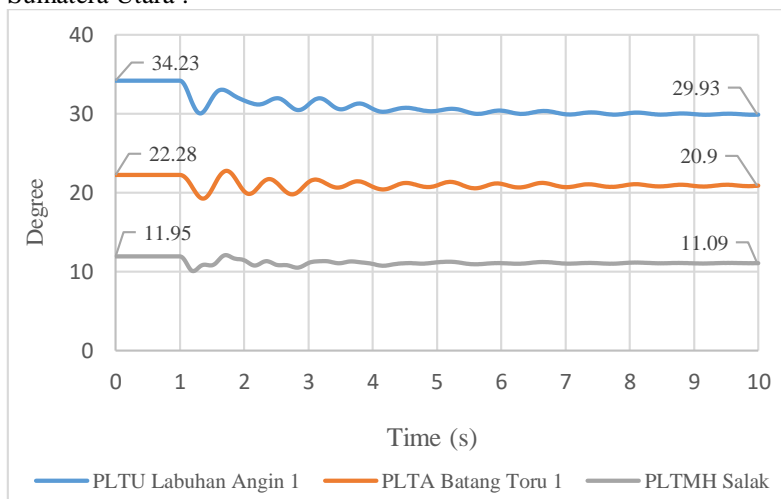


Gambar 4.15 Respon tegangan saat generator PLTGU Sumbagut,delete ($t=1s$)

Pada gambar 4.15 ketika PLTGU Sumbagut 1 dilepas dari sistem saat $t=1s$, terjadi fluktuasi tegangan akibat perubahan pembebanan generator tetapi nilai penurunan tegangan tidak terlalu besar dan dapat kembali *steady state*. Pada bus PLTGU Belawan penurunan dari 148.8 kV *steady state* 148.2 kV, pada bus Pangkalan Susu penurunan tegangan dari 153.7 kV *steady state* 153.4 kV dan pada bus Paya Pasir mengalami penurunan dari 146.4 kV *steady state* 145.4 kV. Jadi, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan 150kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

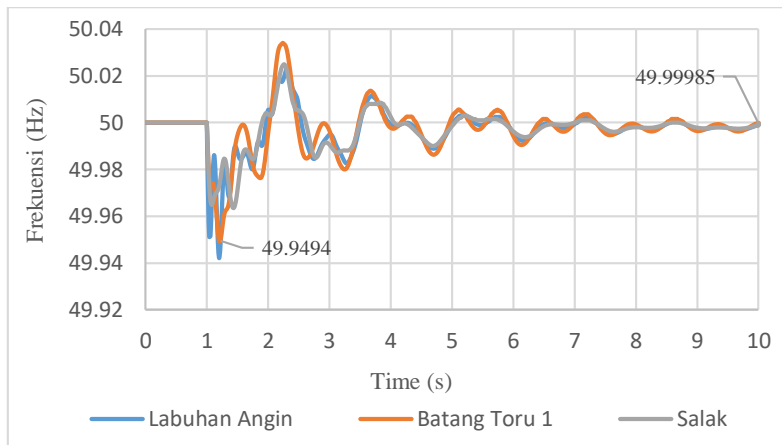
4.2.5 Kondisi Beban Normal (Generator PLTP Sorik Merapi, Delete ($t=1s$))

Pada kondisi beban normal, Kapasitas toatal generator aktif sebesar 7302.24 MW dan daya yang dibangkitkan sebesar 3.026 MW dengan kebutuhan beban 2748.94 MW. Pada *study* kasus pelepasan generator sorik merapi saat $t = 1s$, maka sistem akan kehilangan daya *supply* daya dengan kapasitas sebesar 240 MW dan daya yang dibangkitkan 120 MW atau 4% dari total daya yang dibangkitkan. Berikut ini, hasil simulasi ketika PLTP Sorik Merapi di lepas dari sistem Sumatera Utara :



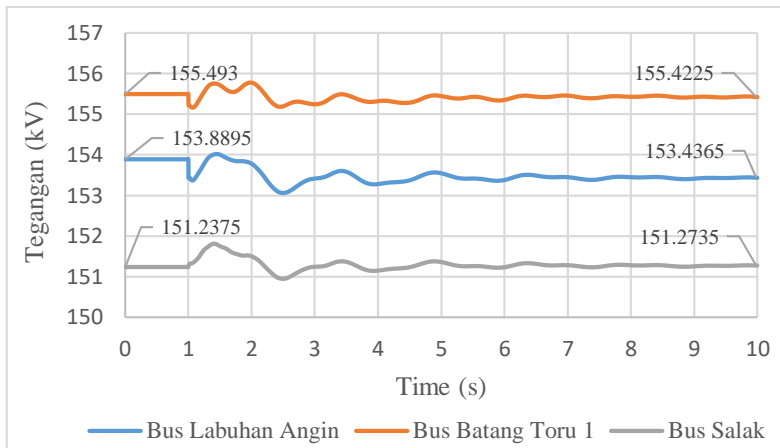
Gambar 4.16 Respon sudut rotor saat generator PLTP Sorik Merapi, *delete* ($t=1s$)

Pada gambar 4.16 dapat dilihat respon sudut rotor saat PLTP Sorik Merapi dilepas dari sistem Sumatera Utara, maka akan terjadi osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga sistem dapat kembali ke kondisi *steady state*. Respon sudut rotor pada generator Labuhan Angin 1 mencapai 34.23 *degree* dan kondisi *steady state* 29.93 *degree*, begitu pula dengan PLTA Batang Toru dan PLTMH Salak. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, respon sudut rotor dalam kondisi stabil.



Gambar 4.17 Respon frekuensi saat generator PLTP Sorik merapi, *delete* (t=1s)

Pada gambar 4.17 respon frekuensi saat pelepasan generator PLTP Sorik Merapi mengalami osilasi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali *steady state*. Hal ini, diakibatkan karena sistem kehilangan daya *supply* secara tiba-tiba. respon frekuensi di Batang Toru mengalami penurunan hingga 49.94 Hz tetapi dapat kembali *steady state* 49.99 Hz. Penurunan frekuensi ini, diakibatkan sistem tiba-tiba kehilangan daya *supply* sebesar 150 MW tetapi dapat kembali ke kondisi *steady state* dikarenakan sistem masih mempunyai cadangan daya aktif yang besar dan masih di range aman frekuensi sesuai standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil.



Gambar 4.18 Respon tegangan saat generator PLTP Sorik merapi, *delete* ($t=1s$)

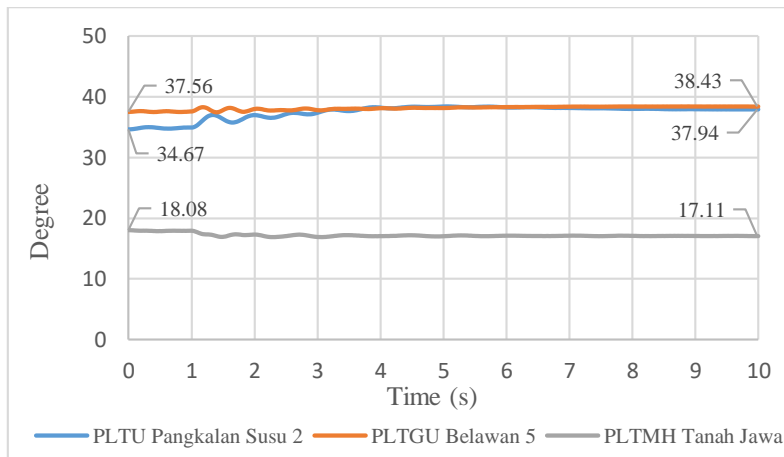
Pada gambar 4.18 ketika generator PLTP Sorik Merapi dilepas dari sistem terjadi fluktuasi tegangan pada semua bus yang tidak terlalu besar. Pada bus Labuhan Angin penurunan tegangan dari 153.8 kV dan *steady state* pada tegangan 153.4 kV. Pada bus Batang Toru 1 tegangan awal 155.49 kV dan *steady state* pada tegangan 155.42 kV. Pada bus Salak tegangan awal 151.23 kV dan *steady state* pada tegangan 151.27 kV. Jadi, dapat disimpulkan bahwa bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

4.3 Pelepasan Satu Saluran dari Saluran Ganda Tanpa Gangguan

Pada *study* kasus pelepasan satu saluran dari saluran ganda terlebih dahulu simulasi aliran daya tujuannya untuk mengetahui aliran daya terbesar yang melewati kabel saluran transmisi. Kestabilan transien pada kasus ini untuk mengamati respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan apabila ada satu saluran dari saluran ganda *trip* tanpa adanya gangguan. Simulasi dilakukan dalam kondisi beban *peak* dan normal, masing-masing 3 kali percobaan dengan aliran daya terbesar yang melewati sistem transmisi Sumatera Utara.

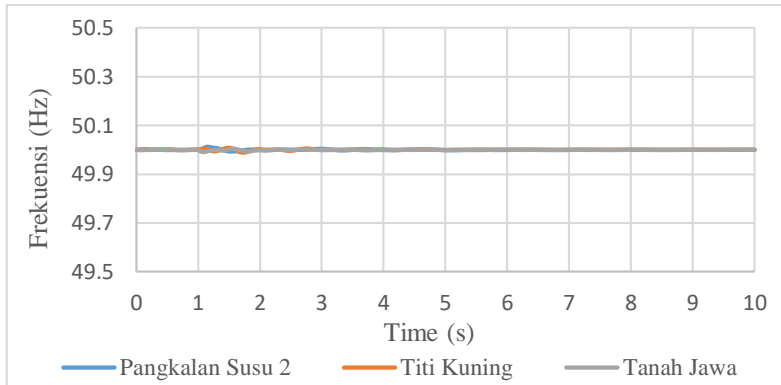
4.3.1 Kondisi Beban *Peak* (*Single Trip*, Saluran Binjai ke Paya Geli)

Hasil dari simulasi aliran daya didapatkan aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban *peak* aliran daya terbesar pertama saat melewati saluran yaitu saluran Binjai ke Paya Geli dengan daya yang melewati sebesar 462.2986 MW. Pengamatan dilakukan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut :



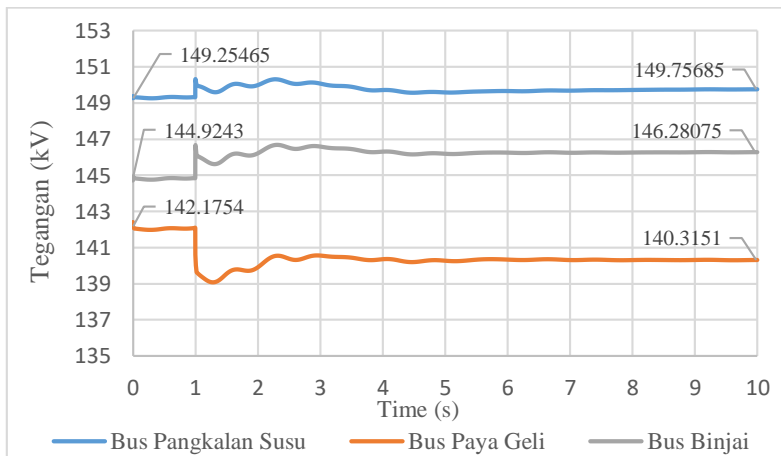
Gambar 4.19 Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran Binjai ke Paya Geli

Pada gambar 4.19 dapat dilihat apabila saat satu saluran dari saluran ganda yaitu saluran Binjai ke Paya Geli *trip* respon sudut rotor mengalami penurunan tetapi dapat kembali *steady state*. Kasus ini, tidak berdampak buruk karena masih bisa di *backup* oleh satu saluran lainnya, karena tujuan dari saluran ganda didesain untuk memaksimalkan penyaluran daya. Pada PLTU Pangkalan Susu dari 34.67 *degree* dan *steady state* pada 37.94 *degree*, PLTGU belawan 5 dari 37.56 *degree* dan *steady state* 38.43 *degree* dan selanjutnya PLTMH Tanah Jawa 18.08 *degree* dan *steady state* 17.1 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor dalam keadaan stabil.



Gambar 4.20 Respon frekuensi, saat pelepasan satu saluran Binjai ke Paya Geli

Dapat dilihat pada gambar 4.20 respon frekuensi ketika terjadi pelepasan satu saluran dari saluran ganda tidak mengalami penurunan frekuensi yang besar karena aliran daya masih bisa mengalir melalui satu saluran yang tidak *trip*. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

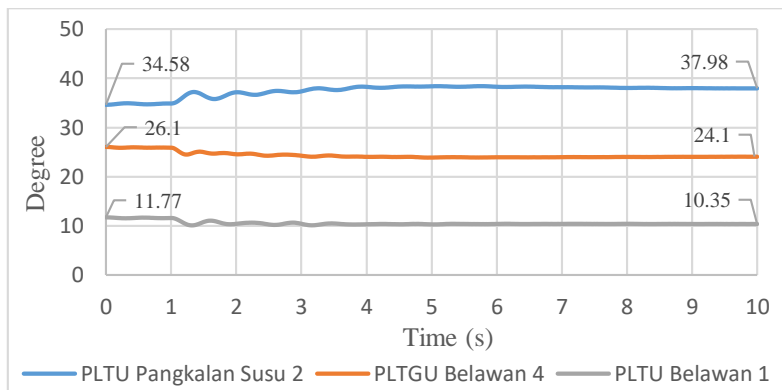


Gambar 4.21 Respon tegangan, saat pelepasan satu saluran Binjai ke Paya Geli

Dapat dilihat pada gambar 4.21 respon tegangan mengalami fluktuasi tetapi tidak terlalu besar dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada bus Pangkalan Susu mengalami peningkatan tegangan dari nilai awal 149.2 kV menjadi 149.7 kV. Bus Paya Geli mengalami penurunan dari nilai awal 142.1 kV menjadi 140,31 kV dan selanjutnya pada bus Binjai mengalami penurunan dari nilai awal tegangan 144.9 kV menjadi 146.2 kV. Jadi, dapat disimpulkan bahwa bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

4.3.2 Kondisi Beban *Peak* (Single Trip, Saluran Pangkalan Susu – Pangkalan Brandan)

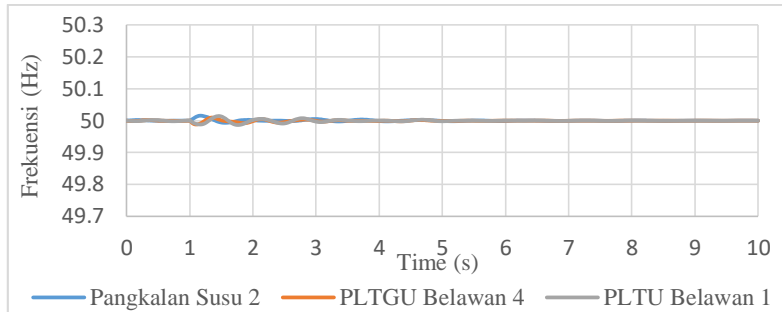
Hasil dari simulasi aliran daya didapatkan aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban *peak* aliran daya terbesar kedua saat melewati saluran yaitu saluran Pangkalan Susu ke Pangkalan Brandan dengan daya yang melewati sebesar 441.18 MW. Pengamatan dilakukan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 4.22 Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran Pangkalan Susu ke Pangkalan Brandan

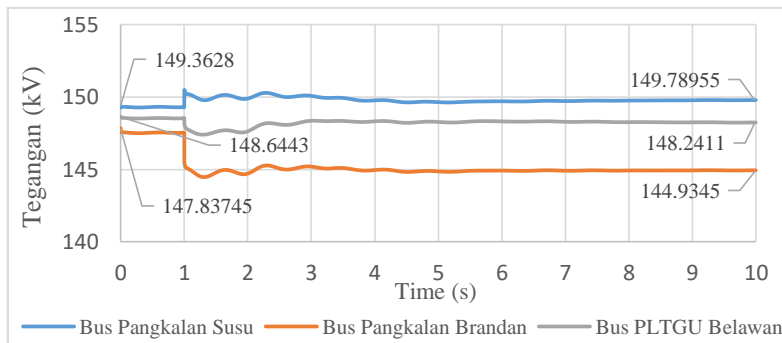
Pada gambar 4.22 dapat dilihat, saat *trip* satu saluran dari saluran ganda yaitu saluran Pangkalan Susu ke P. Brandan, respon sudut rotor mengalami perubahan tetapi dapat kembali *steady state*. Pada PLTU

Pangkalan susu 2 respon sudut rotor mengalami kenaikan dengan ayunan dengan nilai yang kecil dari nilai awal simulasi 34.58 *degree* dan kembali *steady state* 37.98 *degree*. Pada PLTGU Belawan 4 respon sudut rotor mengalami penurunan dari nilai awal 26.1 *degree* menjadi 24.1 *degree* dapat disimpulkan respon sudut rotor masih stabil.



Gambar 4.23 Respon frekuensi, saat pelepasan satu saluran Pangkalan Susu ke Pangkalan Brandan

Dapat dilihat pada gambar 4.23 respon frekuensi ketika terjadi pelepasan satu saluran dari saluran ganda tidak mengalami penurunan frekuensi yang besar karena aliran daya masih bisa mengalir melalui satu saluran yang tidak *trip*. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

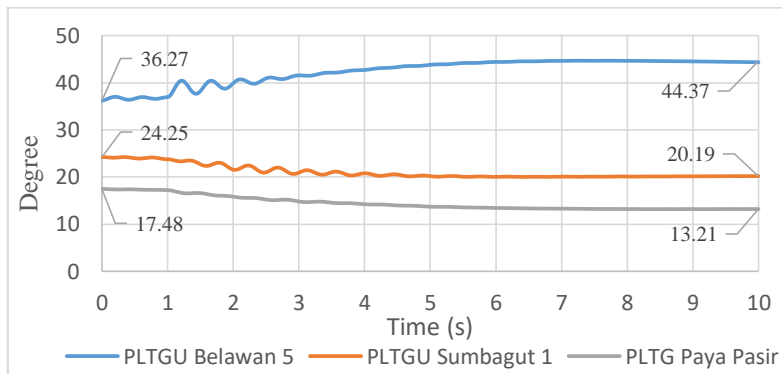


Gambar 4.24 Respon tegangan, saat pelepasan satu saluran Pangkalan susu ke Pangkalan Brandan

Dapat dilihat pada gambar 4.24 respon tegangan mengalami fluktuasi tetapi tidak terlalu besar dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada bus Pangkalan Susu nilai awal simulasi tegangan 149.3 kV menjadi 149.7 kV. Pada bus Pangkalan Brandan nilai awal simulasi tegangan 147.6 kV menjadi 144.9. Jadi, dapat disimpulkan bahwa bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

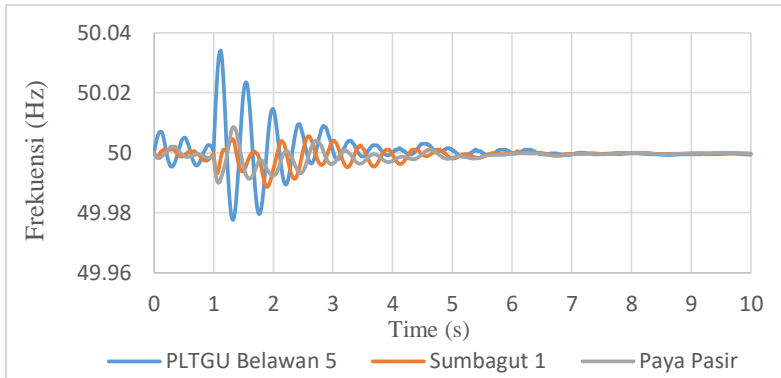
4.3.3 Kondisi Beban *Peak* (Single Trip, Saluran PLTGU Belawan-Sei Rotan)

Hasil dari simulasi aliran daya didapatkan aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban *peak* aliran daya terbesar ketiga saat melewati saluran yaitu PLTGU Belawan ke Sei Rotan dengan daya yang melewati sebesar 367.0828 MW. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut :



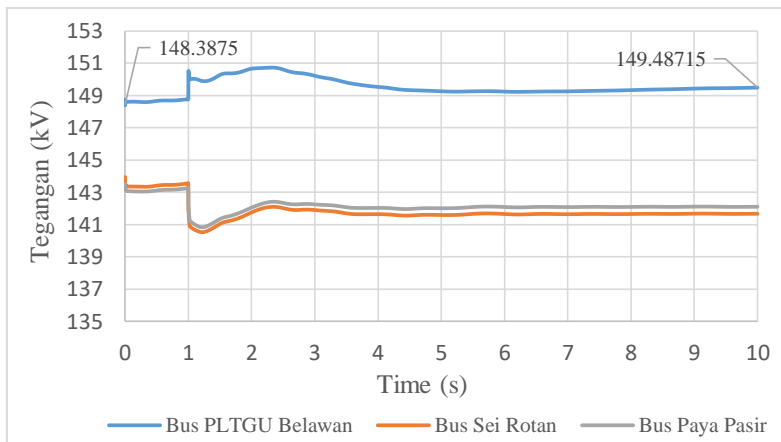
Gambar 4.25 Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran PLTGU Belawan ke Sei Rotan

Pada gambar 4.25 dapat dilihat, saat *trip* satu saluran dari saluran ganda yaitu PLTGU Belawan ke Sei Rotan, mengalami perubahan tetapi dapat kembali *steady state*. Pada PLTGU Belawan respon sudut rotor mengalami kenaikan dari nilai awal simulasi 36.27 *degree* menjadi 44.36 *degree*. Perubahan nilai sudut rotor tidak mengalami perubahan terlalu besar dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.26 Respon frekuensi,saat pelepasan satu saluran PLTGU Belawan ke Sei Rotan

Dapat dilihat pada gambar 4.26 respon frekuensi ketika terjadi pelepasan satu saluran dari saluran ganda tidak mengalami penurunan frekuensi yang besar karena aliran daya masih bisa mengalir melalui satu saluran yang tidak *trip*. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49,583-50,417 Hz.

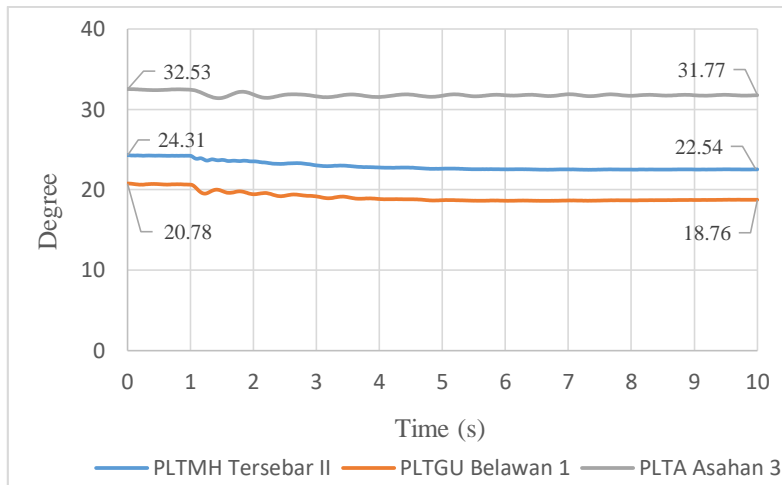


Gambar 4.27 Respon tegangan,saat pelepasan satu saluran PLTGU Belawan ke Sei Rotan

Dapat dilihat pada gambar 4.27 respon tegangan mengalami fluktuasi tetapi tidak terlalu besar dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada bus PLTGU Belawan terjadi fluktuasi yang tidak terlalu besar dari nilai awal simulasi 148.3 kV dan *steady state* pada tegangan 149.4 kV, begitu pula dengan bus Sei Rotan dan Paya Pasir terjadi penurunan tegangan yang tidak terlalu besar dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

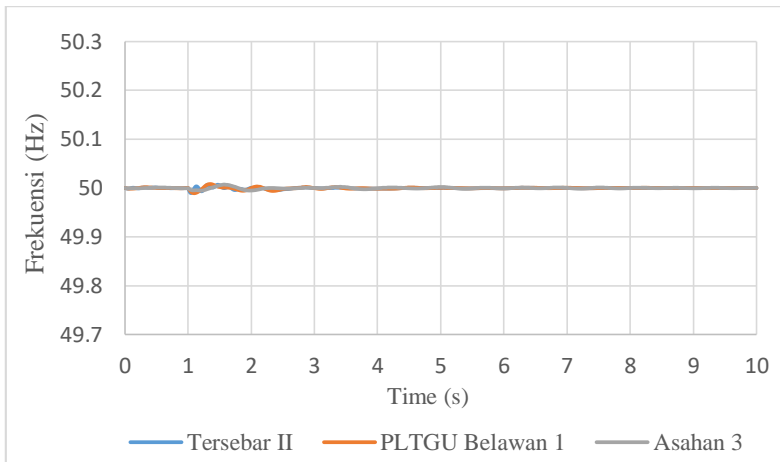
4.3.4 Kondisi Beban Normal (*Single Trip*, Pangkalan Susu-Pangkalan Brandan)

Hasil dari simulasi aliran daya untuk mendapatkan nilai aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban normal aliran daya terbesar pertama saat melewati saluran Pangkalan Susu-Pangkalan Brandan, dengan aliran daya yang melewati sebesar 383.971 MW. Pengamatan dilakukan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut:



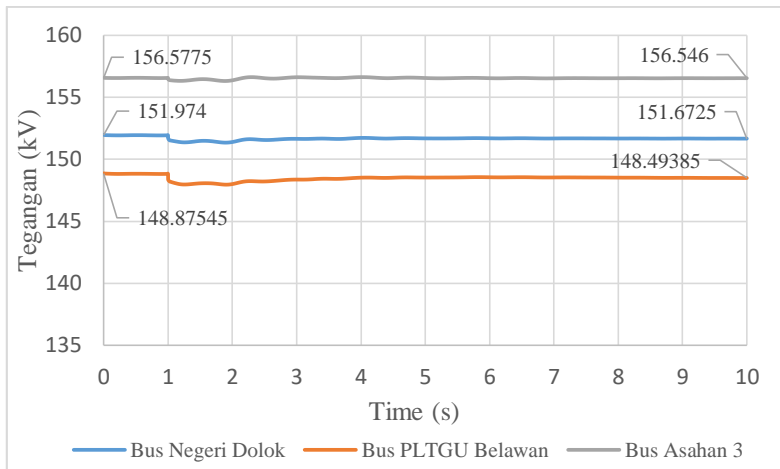
Gambar 4.28 Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran Pangkalan Susu-Pangkalan Brandan

Pada gambar 4.28 dapat dilihat, saat *trip* satu saluran dari saluran ganda yaitu Pangkalan Susu ke P.Brandan respon sudut rotor mengalami perubahan tetapi dapat dengan ayunan kecil dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada generator PLTMH Tersebar II awal simulasi 24.31 *degree* dan *steady state* 22.54 *degree*, PLTGU Belawan 1 dari 20.76 *degree* dan *steady state* pada 18.76 *degree*. Selanjutnya, pada PLTA Asahan 3 dari 32.53 *degree* dan *steady state* pada 31.77 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.29 Respon frekuensi, saat pelepasan satu saluran Pangkalan Susu-Pangkalan Brandan

Dapat dilihat pada gambar 4.29 respon frekuensi ketika terjadi pelepasan satu saluran dari saluran ganda tidak mengalami penurunan frekuensi yang besar karena aliran daya masih bisa mengalir melalui satu saluran yang tidak *trip*. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

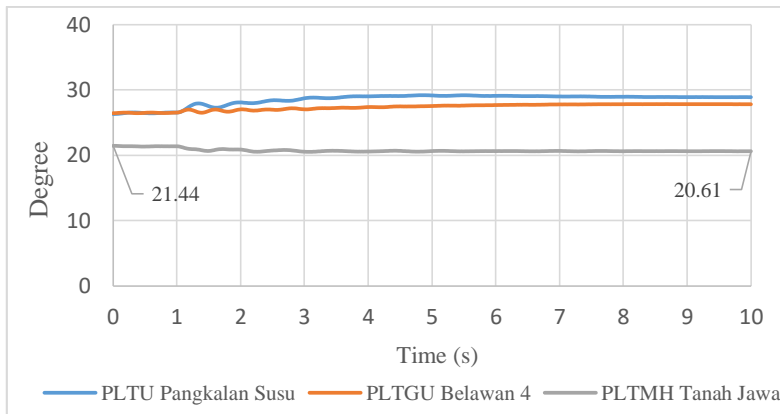


Gambar 4.30 Respon tegangan, saat pelepasan satu saluran Pangkalan Susu-Pangkalan Brandan

Dapat dilihat pada gambar 4.30 respon tegangan mengalami fluktuasi tetapi tidak terlalu besar dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada bus Negeri Delok 151.9 kV menjadi 151.6 kV. Pada bus PLTGU Belawan 148.8 kV menjadi 148.4 kV dan selanjutnya pada bus Asahan 3 mengalami penurunan dari tegangan 156.57 kV menjadi 156.54 kV. Jadi, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

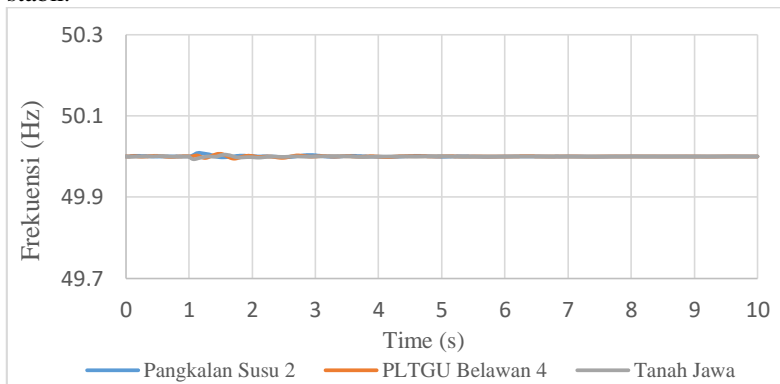
4.3.5 Kondisi Beban Normal (*Single Trip*, Saluran Binjai-Paya Geli)

Hasil dari simulasi aliran daya untuk mendapatkan nilai aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban normal aliran daya terbesar kedua saat melewati saluran Binjai ke Paya Geli dengan aliran daya yang melewati sebesar 335.4 MW. Pengamatan dilakukan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut:



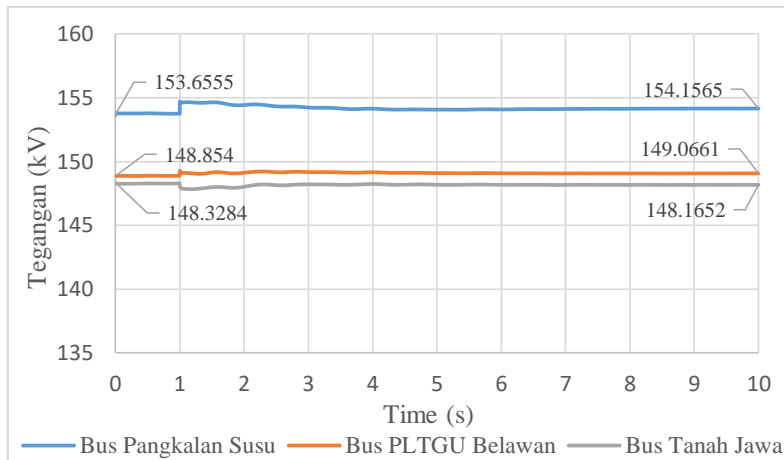
Gambar 4.31 Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran Binjai-Paya Geli

Pada gambar 4.31 dapat dilihat, saat *trip* satu saluran dari saluran ganda yaitu Pangkalan Susu ke P.Brandan, mengalami perubahan tetapi dapat dengan ayunan kecil dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada generator PLTMH Tanah Jawa terjadi penurunan respon sudut rotor dari 21.44 degree dan *steady state* pada 20.61 degree. Perubahan nilai sudut rotor tidak mengalami perubahan terlalu besar dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.32 Respon frekuensi, saat pelepasan satu saluran Binjai-Paya Geli

Dapat dilihat pada gambar 4.32 respon frekuensi ketika terjadi pelepasan satu saluran dari saluran ganda tidak mengalami penurunan frekuensi yang besar karena aliran daya masih bisa mengalir melalui satu saluran yang tidak *trip*. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.



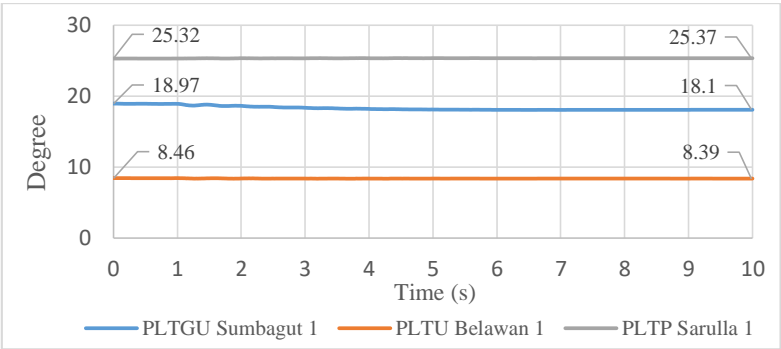
Gambar 4.33 Respon tegangan, saat pelepasan satu saluran Binjai-Paya Geli

Dapat dilihat pada gambar 4.33, respon tegangan pada setiap bus mengalami fluktuasi tetapi tidak terlalu besar sehingga dapat kembali ke *steady state*. Pada bus Pangkalan Susu tegangan awal 153.6 kV mengalami kenaikan menjadi 154.1 kV, pada bus PLTGU Belawan dari 148.8 kV menjadi 149.06 kV dan pada bus Tanah Jawa dari 148.3 kV menjadi 148.1 kV. Jadi, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

4.3.6 Kondisi Beban Normal (*Single Trip*, Saluran Sei Rotan-Percut)

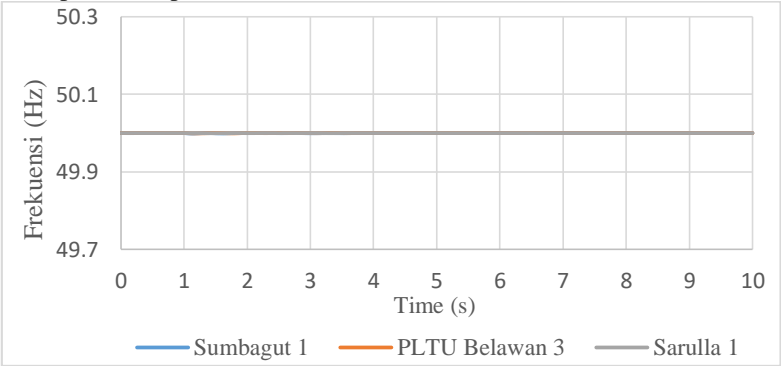
Hasil dari simulasi aliran daya untuk mendapatkan nilai aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban normal aliran daya terbesar ketiga saat melewati saluran Sei Rotan-Percut dengan aliran daya yang melewati sebesar 213.108 MW. Pengamatan dilakukan

dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut:



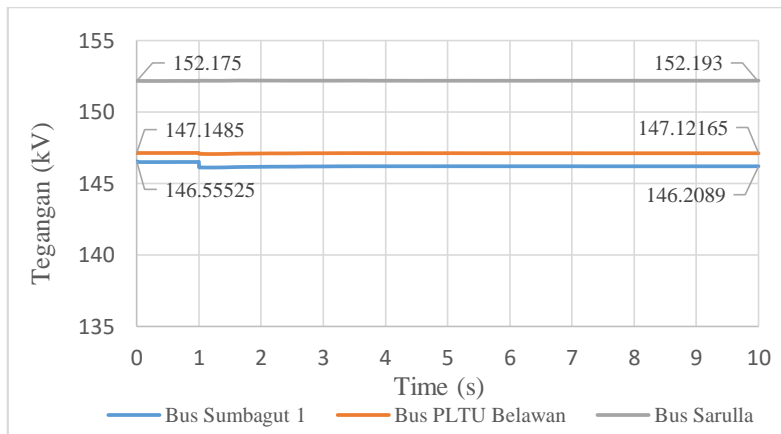
Gambar 4.34 Respon sudut rotor, saat pelepasan satu saluran Sei Rotan-Percut

Pada gambar 4.34 dapat dilihat respon sudut rotor mengalami sedikit penurunan tetapi masih bisa di *backup* oleh satu saluran lainnya. Seperti pada generator PLTGU Sumbagut 1 awal simulasi 18.97 *degree* mengalami penurunan 18.1 *degree*. Untuk lepasnya satu saluran dari dua saluran tidak mempunyai dampak buruk karena tujuan dari desain saluran ganda adalah kontinuitas penyaluran daya, apabila satu saluran lepas sistem masih bisa di *backup* oleh satu saluran lainnya. Sehingga, dapat disimpulkan respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.35 Respon frekuensi, saat pelepasan satu saluran Sei Rotan-Percut

Dapat dilihat pada gambar 4.35 respon frekuensi *steady state* di nilai 50 Hz yang artinya sistem tidak merasakan adanya gangguan ketika satu saluran dari saluran ganda dilepas dari sistem, karena aliran daya masih dapat mengalir pada satu saluran lainnya. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.



Gambar 4.36 Respon tegangan, saat pelepasan satu saluran Sei Rotan-Percut

Dapat dilihat pada gambar 4.36 respon tegangan pada setiap bus tidak merasakan adanya gangguan karena fluktuasi sangat kecil, seperti pada Bus Sumbagut 1 dari nilai awal 146.5 kV menjadi 146.2 kV. Jadi, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

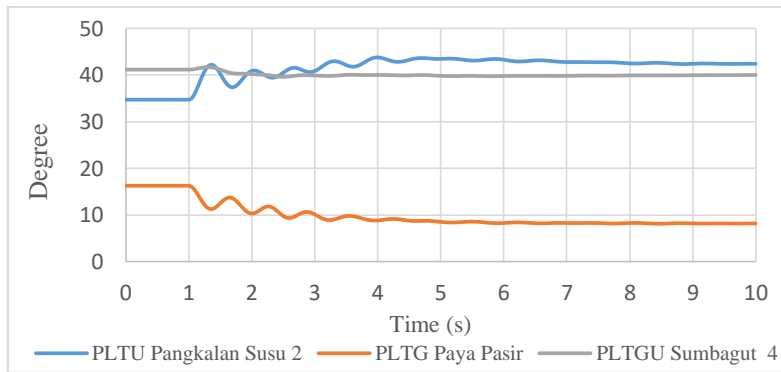
4.4 Pelepasan Dua Saluran dari Saluran Ganda Tanpa Gangguan

Pada *study* kasus pelepasan dua saluran dari saluran ganda bisa menyebabkan ketidakstabilan sistem interkoneksi karena perubahan aliran daya secara mendadak saat melewati saluran. Kasus ini, terlebih dahulu melakukan *running load flow* untuk mengetahui aliran daya terbesar yang melewati saluran interkoneksi. Kestabilan transient pada kasus ini untuk mengamati respon stabil sudut rotor, frekuensi dan

tegangan apabila dua saluran dari saluran ganda *trip* tanpa adanya gangguan. Simulasi dilakukan dalam kondisi beban *peak* dan normal, masing-masing 3 kali percobaan dengan aliran daya terbesar yang melewati sistem transmisi Sumatera Utara.

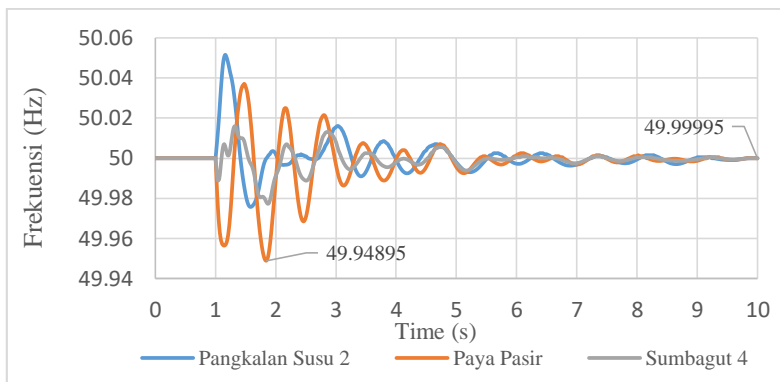
4.4.1 Kondisi Beban *Peak* (*Double Trip*, Saluran Binjai-Paya Geli)

Hasil dari simulasi aliran daya untuk mendapatkan nilai aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban *peak* aliran daya terbesar pertama saat melewati kabel transmisi Binjai ke Paya Geli dengan aliran daya yang melewati saluran sebesar 462.2986 MW. Pengamatan dilakukan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut:



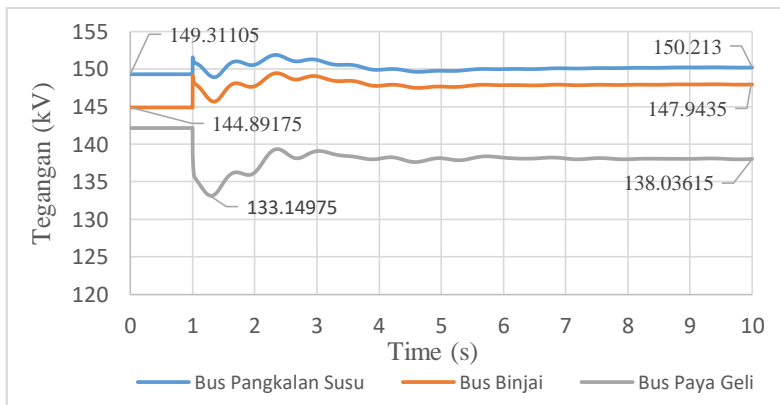
Gambar 4.37 Respon sudut rotor, saat pelepasan dua saluran Binjai-Paya Geli

Pada gambar 4.37 dapat dilihat saat dua saluran dari saluran ganda *trip* yaitu saluran Binjai ke Paya Geli tanpa adanya gangguan maka sudut rotor mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali *steady state*. Pada sudut rotor generator PLTU pangkalan Susu mengalami kenaikan dari 34.72 *degree* dan *steady state* pada detik ke-10 sebesar 42.41 *degree*. Pada generator PLTG Paya Pasir mengalami penurunan dari 16.27 *degree* menjadi 8.18 *degree* dan selanjutnya pada generator PLTGU sumbagut 4 dari 41.17 *degree* menjadi 40.01 *degree*. Jadi dapat disimpulkan, bahwa respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.38 Respon frekuensi, saat pelepasan dua saluran Binjai-Paya Geli

Pada gambar 4.38 respon frekuensi mengalami osilasi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali ke kondisi *steady state*, seperti pada bus paya pasir mengalami osilasi dengan penurunan sebesar 49.94 Hz dan kembali *steady state* pada detik ke-10 sebesar 49.99 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

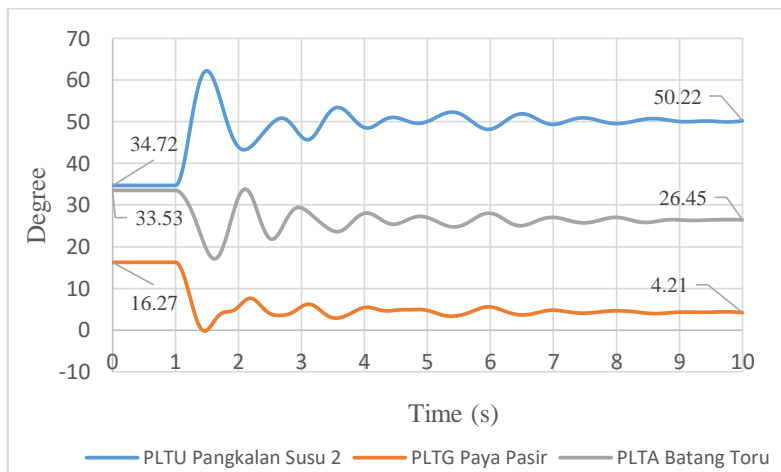


Gambar 4.39 Respon tegangan, saat pelepasan dua saluran Binjai-Paya Geli

Pada gambar 4.39 dapat dilihat respon tegangan mengalami fluktuasi tetapi dapat kembali ke kondisi *steady state* sistem. Pada bus Pangkalan Susu mengalami kenaikan tegangan dari 149.3 kV menjadi 150 kV, pada bus Binjai mengalami kenaikan dari 144.8 kV menjadi 147.9 kV dan selanjutnya pada bus Paya Geli mengalami penurunan maksimal hingga 133.1 kV dan dapat kembali meningkat sebesar 138 kV. Sehingga dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

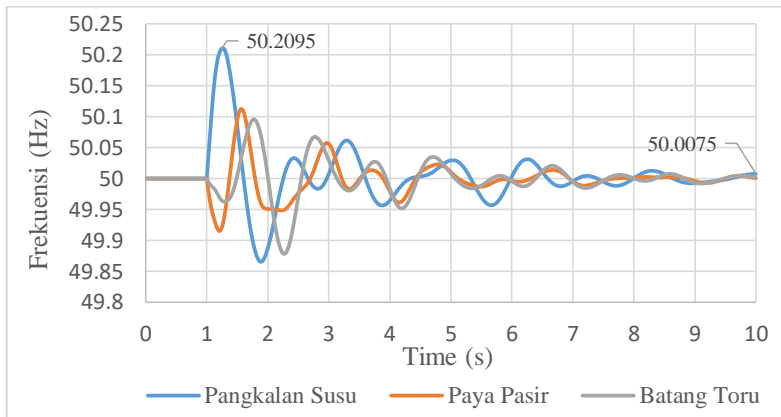
4.4.2 Kondisi Beban *Peak* (*Double Trip*, Saluran Pangkalan Susu – Pangkalan Brandan)

Hasil dari simulasi aliran daya untuk mendapatkan nilai aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban *peak* aliran daya terbesar kedua saat melewati kabel transmisi Pangkalan Susu ke Pangkalan Brandan dengan aliran daya yang melewati saluran sebesar 441.18 MW. Pengamatan dilakukan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut:



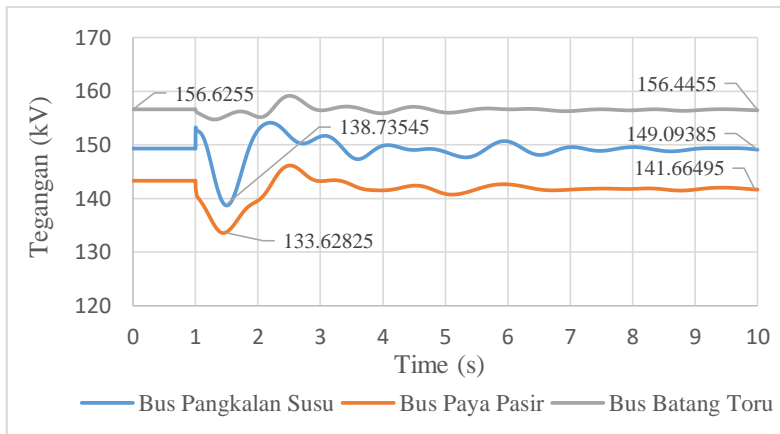
Gambar 4.40 Respon sudut rotor, saat pelepasan dua saluran Pangkalan Susu-Pangkalan Brandan

Pada gambar 4.40 respon sudut rotor ketika saluran yang menghubungkan Pangkalan Susu ke Pangkalan Brandan *trip* dua saluran dari saluran ganda maka terjadi osilasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali ke kondisi *steady state* sistem transmisi. Seperti pada generator PLTU Pangkalan Susu mengalami kenaikan dari 34.72 *degree* dan mengalami osilasi tetapi dapat kembali ke kondisi *steady state* pada 50.22 *degree*. Pada generator PLTG paya pasir dari 16.27 *degree* menjadi 4.21 *degree* dan pada generator PLTA Batang Toru dari 33.53 *degree* menjadi 26.45 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.41 Respon frekuensi, saat pelepasan dua saluran Pangkalan Susu-Pangkalan Brandan

Pada gambar 4.41 dapat dilihat respon frekuensi mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali ke kondisi *steady state*, seperti pada bus Pangkalan Susu respon frekuensi mengalami kenaikan maksimal 50.2 Hz dan menurun hingga *steady state* pada detik ke-10 sebesar 50 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

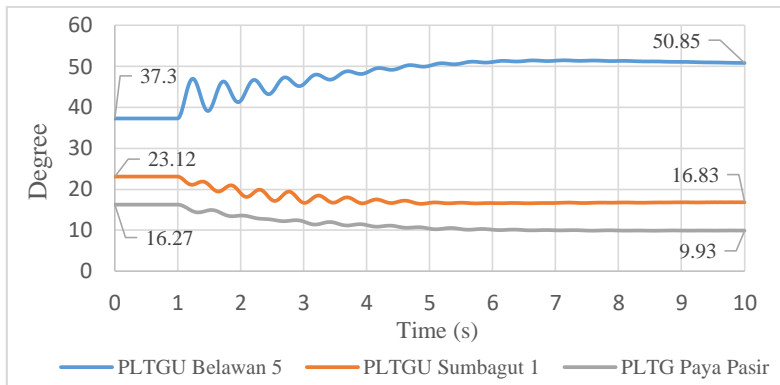


Gambar 4.42 Respon tegangan, saat pelepasan dua saluran pada Pangkalan Susu-Pangkalan Brandan

Pada gambar 4.42 respon tegangan mengalami fluktuasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali *steady state*. seperti pada bus Pangkalan Susu mengalami penurunan maksimal 138.7 kV dan kembali meningkat sebesar 149.09 kV, pada Bus Paya Pasir juga mengalami penurunan maksimal 133.6 kV dan kembali meningkat sebesar 141.6 kV sedangkan pada bus Batang Toru pada awal simulasi tegangan 156.6 kV menjadi 156.4 kV. Sehingga dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

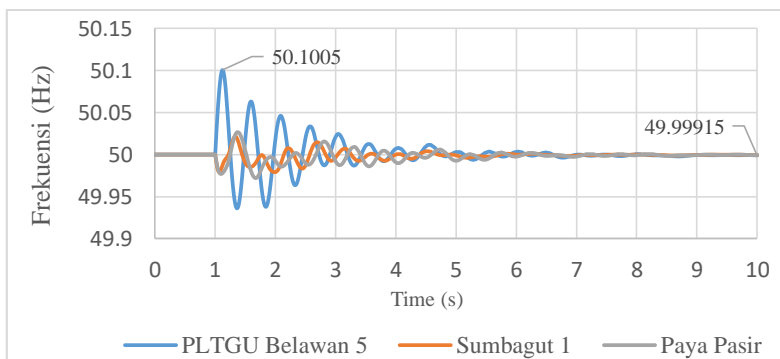
4.4.3 Kondisi Beban Peak (*Double Trip*, Saluran PLTGU Belawan-Sei Rotan)

Hasil dari simulasi aliran daya untuk mendapatkan nilai aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban *peak* aliran daya terbesar ketiga saat melewati kabel transmisi PLTGU Belawan ke Sei Rotan dengan aliran daya yang melewati saluran sebesar 367,0828 MW. Pengamatan dilakukan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut:



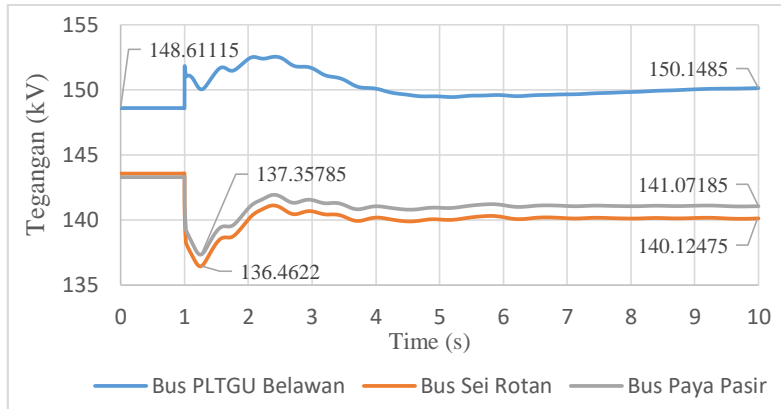
Gambar 4.43 Respon sudut rotor, saat pelepasan dua saluran PLTGU Belawan-Sei Rotan

Pada gambar 4.43 respon sudut rotor ketika saluran yang menghubungkan PLTGU Belawan ke Sei Rotan *trip* dua saluran dari saluran ganda maka terjadi osilasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali ke kondisi *steady state* sistem transmisi. Pada generator PLTGU Belawan 5 mengalami osilasi dari nilai awal 37.3 degree dan *steady state* pada 50.85 degree. Pada generator PLTGU Sumbagut 1 dari 23.12 degree menjadi 16.83 degree selanjutnya pada PLTG Paya Pasir dari 16.27 degree menjadi 9.94 degree. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.44 Respon frekuensi, saat pelepasan dua saluran PLTGU Belawan-Sei Rotan

Pada gambar 4.44 dapat dilihat respon frekuensi mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Seperti pada bus Sumbagut 1 mengalami kenaikan maksimal 50.1 Hz dan menurun hingga *steady state* hingga 49.9 Hz. Sehingga, dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.



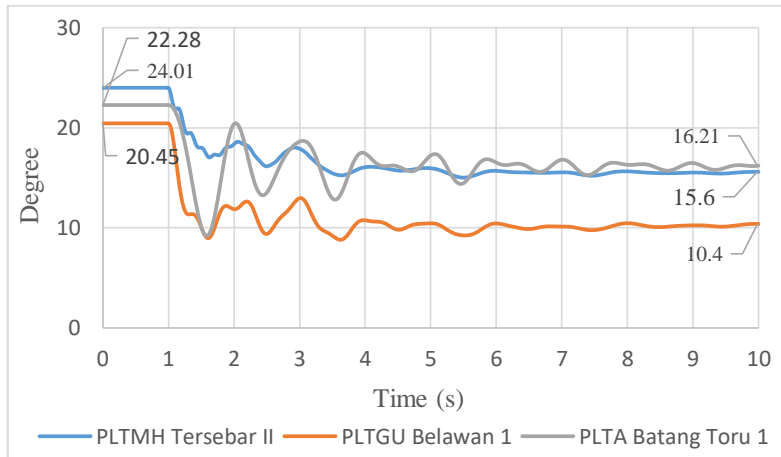
Gambar 4.45 Respon tegangan, saat pelepasan dua saluran PLTGU Belawan-Sei Rotan

Pada gambar 4.45 respon tegangan mengalami fluktuasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali *steady state*. Pada bus PLTGU Belawan mengalami osilasi dari nilai awal simulasi 148.6 kV menjadi 150.1 kV. Pada bus Sei Rotan tegangan mengalami penurunan maksimal 136.4 kV dan meningkat hingga kondisi *steady state* 140.1 kV. Dan bus Paya Pasir tegangan menurun maksimal 137.3 kV dan meningkat hingga *steady state* hingga 141.07 kV. Sehingga dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan nominal 150kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

4.4.4 Kondisi Beban Normal (*Double Trip*, Saluran Pangkalan Susu-Pangkalan Brandan)

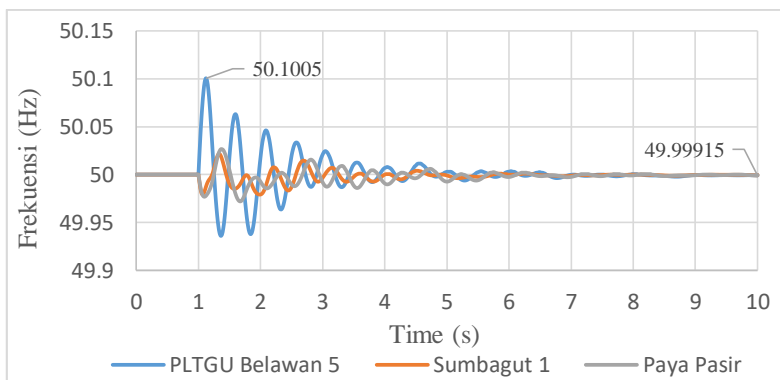
Hasil dari simulasi aliran daya untuk mendapatkan nilai aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban normal aliran daya terbesar pertama saat melewati kabel transmisi Pangkalan Susu-P.Brandan dengan aliran daya yang melewati saluran sebesar

383.9712 MW. Pengamatan dilakukan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut:



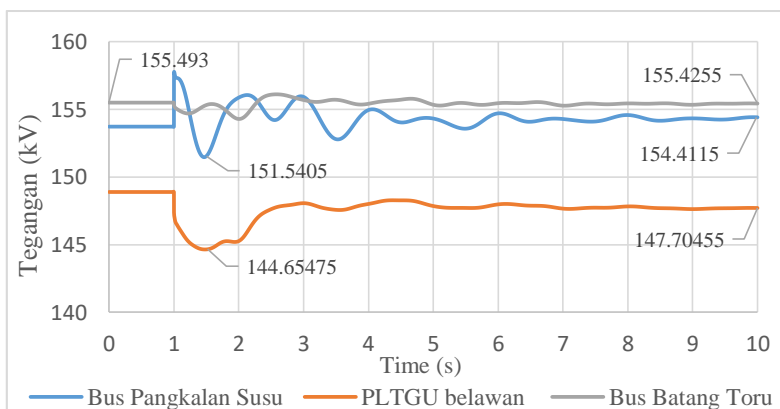
Gambar 4.46 Respon Sudut Rotor, saat pelepasan dua saluran Pangkalan Susu-Pangkalan Brandan

Pada gambar 4.46 dapat dilihat respon sudut rotor ketika saluran yang menghubungkan Pangkalan Susu ke P.Brandan *trip* maka terjadi osilasi tetapi dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada generator PLTMH Tersebar II respon sudut rotor dari 20.01 *degree* mengalami penurunan dan *steady state* pada 15.6 *degree*. Pada generator PLTGU Belawan 1 dari 20.45 *degree* mengalami penurunan hingga *steady state* pada 10.4 *degree* dan selanjutnya generator PLTA Batang Toru dari 22.28 *degree* menjadi 16.22 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.47 Respon frekuensi,saat pelepasan dua saluran Pangkalan Susu-P.Brandan

Pada gambar 4.47 dapat dilihat respon frekuensi mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Seperti pada Tersebar II mengalami kenaikan maksimal hingga 50.105 Hz dan menurun hingga *steady state* hingga 49.99 Hz. Begitu pula, dengan bus PLTGU Belawan 1 dan Batang Toru *steady state* pada detik ke-10 sebesar 49.99 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

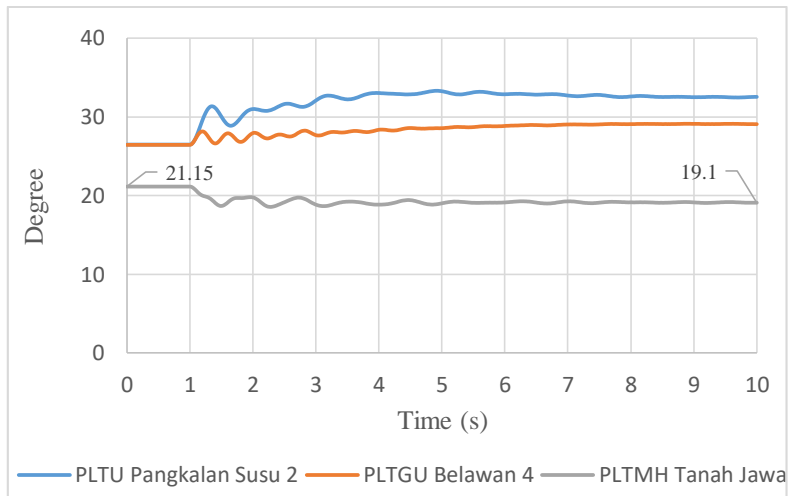


Gambar 4.48 Respon tegangan,saat pelepasan dua saluran Pangkalan Susu-Pangkalan Brandan

Pada gambar 4.48 respon tegangan mengalami fluktuasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali *steady state*. Pada Pangkalan Susu terjadi penurunan tegangan maksimal 151.5 kV dan meningkat hingga *steady state* 154.4 kV. Pada bus PLTGU Belawan mengalami penurunan maksimal 144.6 kV dan *steady state* 147.7 kV. Selanjutnya pada bus Batang Toru tegangan awal 155.49 kV menjadi 155.42 kV. Jadi, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

4.4.5 Kondisi Beban Normal (*Double Trip*, Saluran Binjai-Paya Geli)

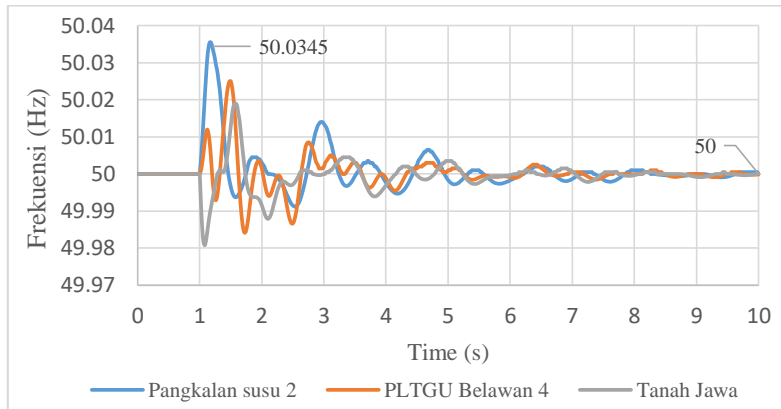
Hasil dari simulasi aliran daya untuk mendapatkan nilai aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban normal aliran daya terbesar kedua saat melewati kabel paya geli ke binjai dengan aliran daya yang melewati saluran sebesar 335.4 MW. Pengamatan dilakukan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 4.49 Respon sudut rotor, saat pelepasan dua saluran Binjai-Paya Geli

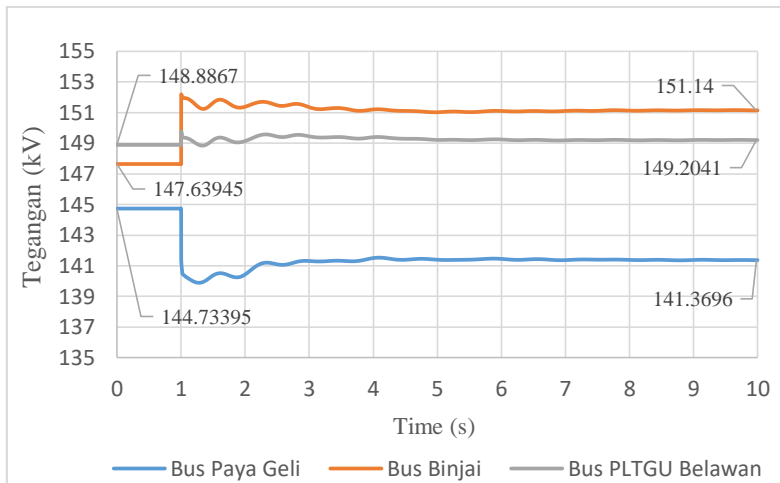
Pada gambar 4.49 dapat dilihat ketika saluran Binjai ke Paya Geli dilepas maka respon sudut rotor semua generator mengalami osilasi tetapi nilainya kecil sehingga dapat kembali *steady state*. Pada generator

PLTMH Tanah Jawa respon sudut rotor dari 21.15 *degree* dan mengalami osilasi yang kecil sehingga dapat kembali *steady state* pada 19.1 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.50 Respon frekuensi, saat pelepasan dua saluran Binjai-Paya Geli

Pada gambar 4.50 dapat dilihat respon frekuensi mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Seperti pada bus Pangkalan Susu mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil dengan kenaikan maksimal 50.03 Hz dan *steady state* pada 50 Hz. Begitu pula bus PLTGU Belawan 4 dan Tanah Jawa *steady state* pada 50 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

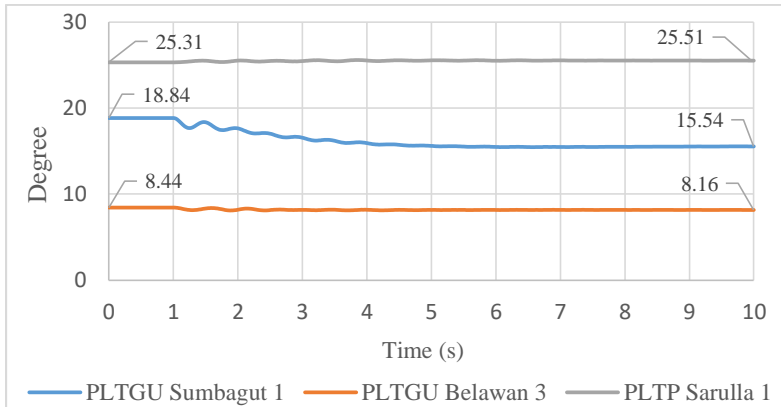


Gambar 4.51 Respon tegangan,saat pelepasan dua saluran Binjai-Paya Geli

Pada gambar 4.51 respon tegangan mengalami fluktuasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali *steady state*. Pada bus Paya Geli pada awal simulasi nilai nya 144.7 kV menjadi 141.3 kV, pada bus Binjai dari 147.6 kV tegangan nya naik hingga *steady state* pada 151.14 kV dan selanjutnya PLTGU Belawan dari 148.8 kV menjadi 149.2 kV. Jadi, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

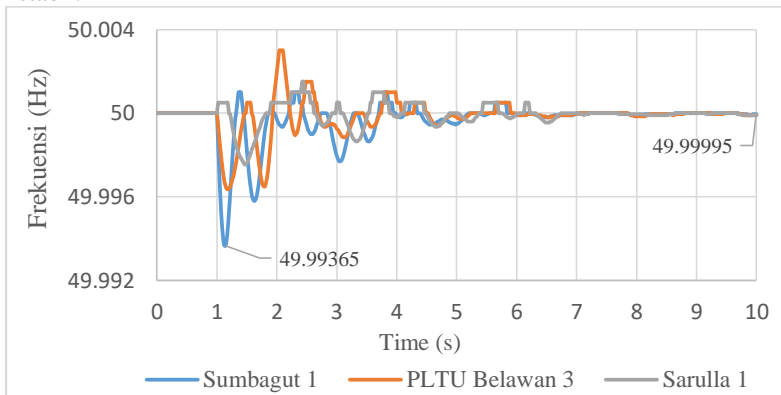
4.4.6 Kondisi Beban Normal (*Double Trip*, Saluran Sei Rotan-Percut)

Hasil dari simulasi aliran daya untuk mendapatkan nilai aliran daya terbesar yang melewati saluran. Pada saat kondisi beban normal aliran daya terbesar ketiga saat melewati saluran Sei rotan ke Percut dengan aliran daya yang melewati saluran sebesar 213.108 MW. Pengamatan dilakukan dengan memperhatikan respon stabil sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut:



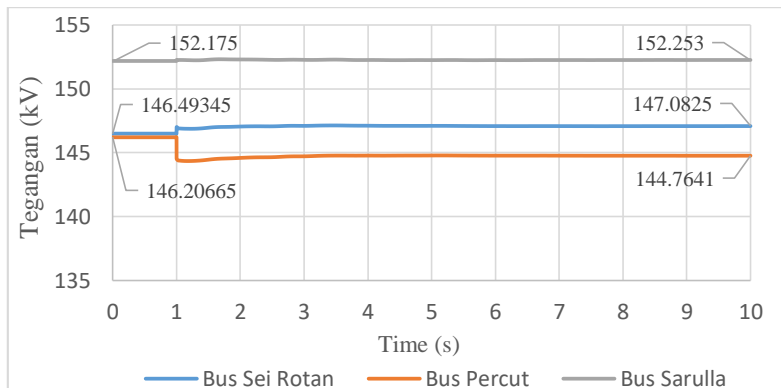
Gambar 4.52 Respon sudut rotor, saat pelepasan dua saluran Sei Rotan-Percut

Pada gambar 4.52 dapat dilihat ketika terjadi pelepasan dua saluran dari saluran ganda tanpa adanya gangguan maka respon sudut rotor mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada generator PLTGU Sumbagut 1 dari 18.84 *degree* menjadi 15.54 *degree*, pada PLTU Belawan 3 dari 8.44 *degree* menjadi 8.16 *degree* dan pada generator PLTP Sarulla 1 dari 25.31 *degree* menjadi 25.51 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.53 Respon frekuensi, saat pelepasan dua saluran Sei Rotan-Percut

Pada gambar 4.53 dapat dilihat respon frekuensi mengalami oilasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali ke kondisi *steady state*. Seperti pada bus Sumbagut 1 penurunan dengan nilai yang kecil yaitu 49.993 Hz dan *steady state* pada 49.999 Hz. Begitu pula dengan bus PLTU Belawan 3 dan Sarulla 1 *steady state* pada 49.99 Hz atau mendekati frekuensi nominal sistem yaitu 50 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.



Gambar 4.54 Respon tegangan,saat pelepasan dua saluran Sei Rotan-Percut

Pada gambar 4.54 respon tegangan mengalami fluktuasi tetapi dengan nilai yang kecil dan dapat kembali *steady state*. Pada bus Sei Rotan tegangan dari 146.4 kV mengalami kenaikan dan *steady state* pada 147 kV. Pada bus Percut nilai awal respon tegangan 146.2 kV mengalami penurunan hingga *steady state* pada 144.7 kV dan pada bus Sarulla nilai awal 152.1 kV *steady state* pada 152.2 kV. Sehingga dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dalam kondisi stabil berdasarkan standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.

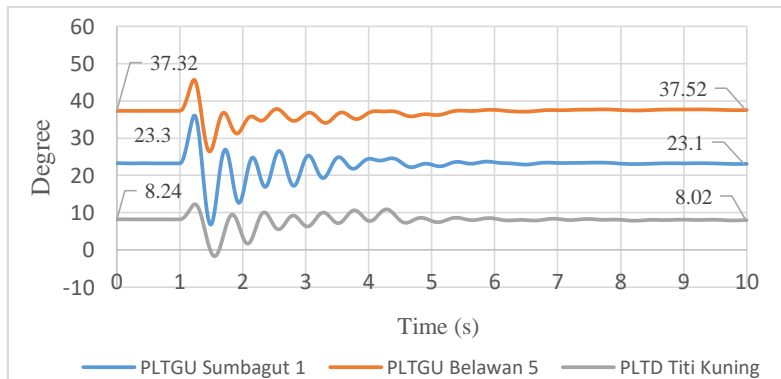
4.5 Single Pole Auto Reclosing Time

Pada kasus *single pole auto reclosing Time* terlebih dahulu *running short circuit* untuk mengetahui lokasi bus dengan nilai hubung singkat terbesar sehingga dapat menentukan waktu pemutusan dan

penutupan saluran kembali dengan Analisis stabilitas transient. dengan menggunakan standar *voltage sag* (SEMI F47) untuk memberi batas lama waktu kedip tegangan yang diperbolehkan, pada SEMI F47 saat tegangan 50% dari tegangan nominal 150 kV yaitu 75 kV diperbolehkan selama 0.2 detik, saat 70% dari tegangan nominalnya 150 kV yaitu 105 kV diperbolehkan selama 0.5 detik sedangkan saat 80% dari tegangan nominal 80% yaitu 120 kV yang diperbolehkan adalah 1 detik. Sedangkan untuk waktu tunda yang digunakan untuk menutup kembali *circuit breaker* (CB) menggunakan standar yang diperbolehkan PLN untuk jenis *single pole auto reclosing* (SPAR) waktu yang diperbolehkan 0.8-1 detik dan yang dipakai dalam tugas akhir ini menggunakan 0.9 detik. Pada kasus *single pole auto reclosing time* dengan memperhatikan respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan masing-masing tiga kali simulasi.

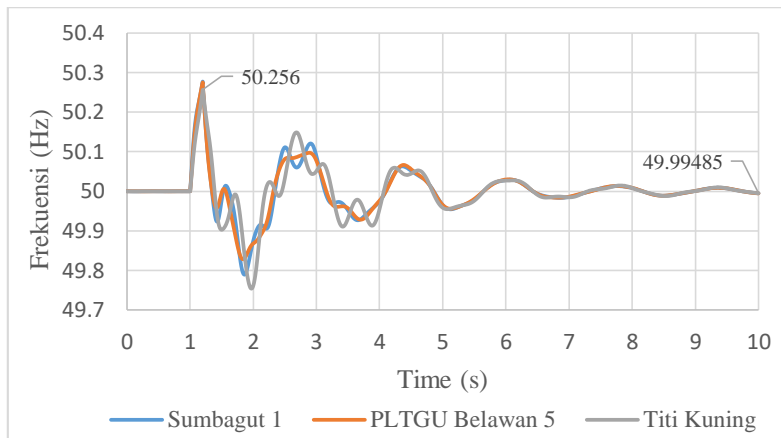
4.5.1 Kondisi Beban *Peak*, pada Saluran Sei Rotan-Percut (HS 1 Fasa)

Pada kondisi *peak*, nilai arus hubung singkat 1 fasa kenah terbesar pertama pada saluran yang menghubungkan Sei Rotan ke Percut dengan nilai hubung singkat 41. 525 kA. Pada kondisi *peak* waktu *trip* CB adalah 0.2 detik setelah gangguan karena berdasarkan standar *voltage sag* (SEMI F47) saat ketip tegangan tegangan turun hingga 50% sampai 70% dari tegangan nominalnya 150 kV maka yang diperbolehkan 0.2 detik, sedangkan waktu CB menutup kembali 0.9 detik setelah gangguan dihilangkan berdasarkan standar yang diperbolehkan PLN.



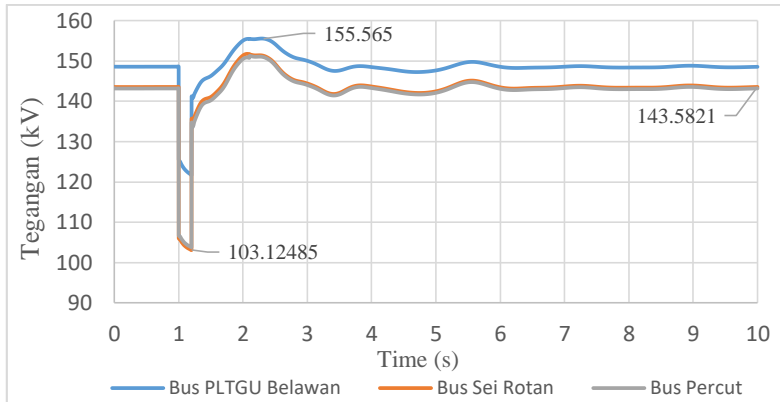
Gambar 4.55 Respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah Sei Rotan-Percut

Pada gambar 4.55 respon sudut rotor semua generator mengalami osilasi tetapi nilai nya kecil sehingga dapat kembali ke kondisi *steady state*. Seperti pada generator Sumbagut 1 nilai awal simulasi 23.3 *degree* menjadi 23.1 *degree*, pada generator PLTGU Belawan 5 dari 37.32 *degree* menjadi 37.52 *degree* dan selanjutnya PLTD Titi Kuning dari 8.24 *degree* menjadi 8.02 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.56 Respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah Sei Rotan-Percut

Pada gambar 4.56 dapat dilihat respon frekuensi pada semua generator mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil, seperti pada bus Titi Kuning kenaikan maksimal sebesar 50.256 Hz dan mengalami osilasi hingga *steady state* pada 49.99 Hz begitu pula sumbagut 1 dan PLTGU Belawan 5 yang mengalami osilasi hingga *steady state* pada 49.99 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

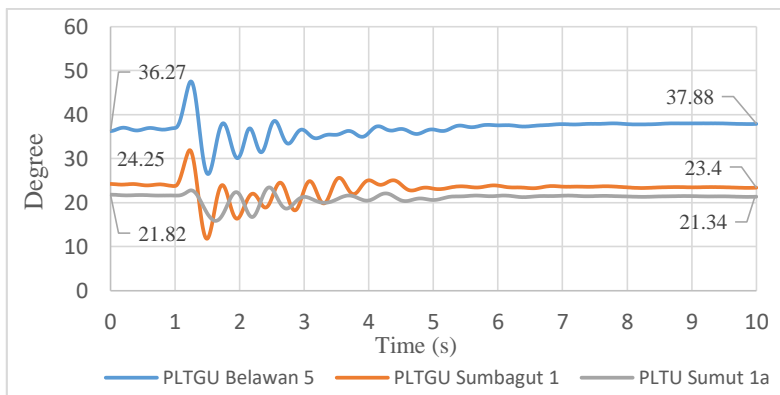


Gambar 4.57 Respon tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah Sei Rotan-Percut

Pada gambar 4.57 dapat dilihat ketika ada hubung singkat 1 fasa ketanah pada bus gangguan yaitu Sei Rotan terdapat penurunan sebesar 103.12 kV atau 68.7% dari tegangan nominalnya 150 kV. Penurunan tegangan Sei Rotan mencapai 68.7% maka ketip tegangan yang diperbolehkan selama 0.2 detik hal ini, berdasarkan standar menurut *voltage sag* SEMI F47 yang menyatakan bahwa tegangan 50% sampai 70 % dari tegangan nominalnya waktu yang diperbolehkan untuk ketip tegangan selama 0.2 detik. Tegangan pada bus Sei Rotan dapat kembali ke kondisi *steady state* saat detik ke-10 sebesar 143.5 kV. Sehingga, dapat disimpulkan range standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV sampai 157.5 kV.

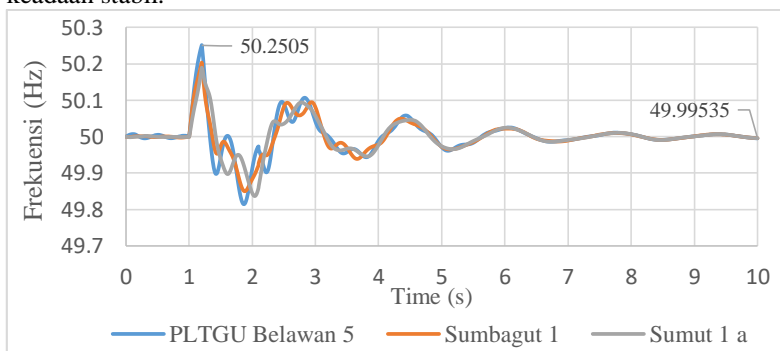
4.5.2 Kondisi Beban *Peak*, pada Saluran PLTGU Belawan-Sei Rotan (HS 1 Fasa)

Pada kondisi *peak*, nilai arus hubung singkat 1 fasa kenah terbesar kedua pada saluran yang menghubungkan PLTGU Belawan ke Sei Rotan dengan nilai hubung singkat 38.902 kA. Pada kondisi *peak* waktu *trip* CB adalah 0.2 detik setelah gangguan. hal ini berdasarkan standar *voltage sag* (SEMI F47) yang menyatakan bahwa penurunan tegangan hingga 50% sampai 70% dari tegangan nominalnya 150 kV maka yang diperbolehkan untuk ketip tegangan selama 0.2 detik, sedangkan waktu CB menutup kembali 0.9 detik setelah gangguan dihilangkan berdasarkan standar yang diperbolehkan PLN.



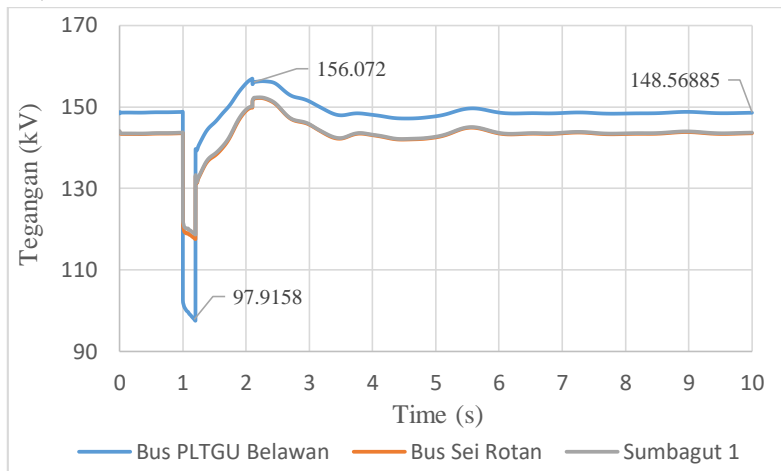
Gambar 4.58 Respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan-Sei Rotan

Pada gambar 4.58 respon sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada generator PLTGU belawan 5 nilai awal simulasi 36.27 *degree* osilasi hingga mencapai kondisi *steady state* pada 37.88 *degree*. Pada generator PLTGU Sumbagut 1 nilai awal simulasi dari 24.25 *degree* hingga mencapai kondisi *steady state* pada 23.4 *degree* dan pada selanjutnya pada generator PLTU Sumut 1a dari 21.82 *degree* mengalami osilasi hingga mencapai kondisi *steady state* pada 21.34 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor dalam keadaan stabil.



Gambar 4.59 Respon respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan-Sei Rotan

Pada gambar 4.59 dapat dilihat ketika hubung singkat satu fasa ketanah maka respon sudut rotor pada semua bus mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil hingga mencapai *steady state*. Seperti pada PLTGU Belawan respon frekuensi mengalami kenaikan sebesar 50.2 Hz dan dapat kembali *steady state* pada 49.99 Hz. Begitu pula dengan Sumbagut 1 dan Sumut 1 *steady state* pada 49.99 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

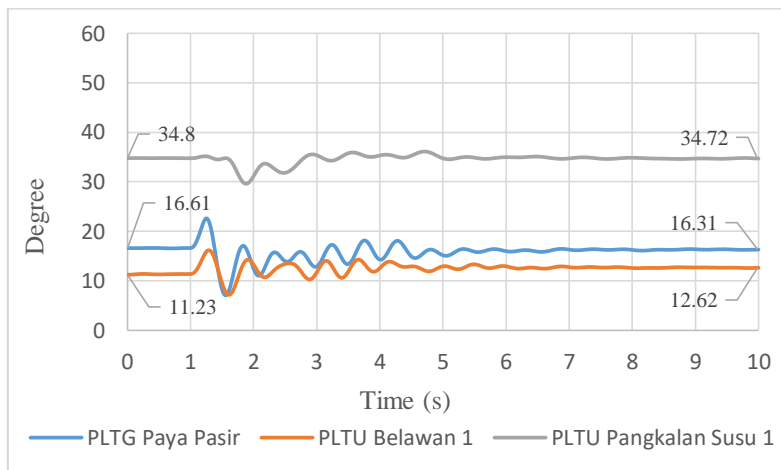


Gambar 4.60 Respon respon tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan-Sei Rotan

Pada gambar 4.60 dapat dilihat ketika ada hubung singkat 1 fasa ketanah pada bus gangguan PLTGU Belawan mengalami penurunan sebesar 97.9158 kV atau 65.22% dari tegangan nominalnya 150 kV. Penurunan sebesar 65.27% waktu kedip tegangan yang diperbolehkan menurut selama 0.2 detik setelah gangguan. Hal ini berdasarkan standar *voltage sag* SEMI F47 saat penurunan tegangan 50 % sampai 70 % dari tegangan nominalnya waktu yang diperbolehkan untuk kedip tegangan selama 0.2 detik. Tegangan pada bus PLTGU Belawan dapat kembali ke kondisi *steady state* saat detik ke-10 sebesar 148.5 kV dan masih dalam range standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV sampai 157.5 kV.

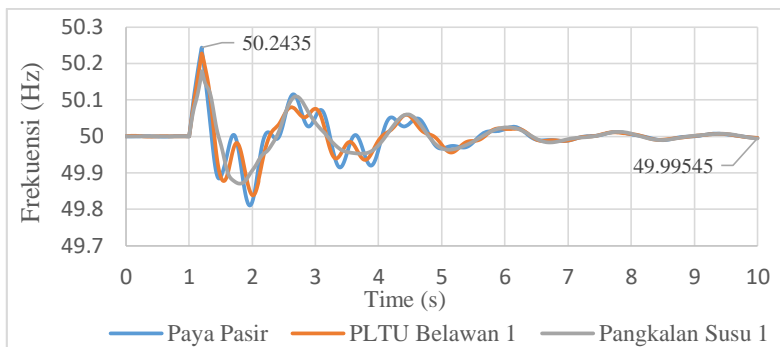
4.5.3 Kondisi Beban *Peak*, pada Saluran Paya Pasir-Belawan (HS 1 Fasa)

Pada kondisi *peak*, nilai arus hubung singkat 1 fasa kenah terbesar ketiga pada saluran yang menghubungkan Paya Pasir ke Belawan yang dengan nilai hubung singkat 31.86 kA. Pada kondisi *peak* waktu *trip* CB adalah 0.2 detik setelah gangguan kerana berdasarkan standar *voltage sag* (SEMI F47) saat ketip tegangan tegangan turun hingga 50% sampai 70% dari tegangan nominalnya 150 kV maka yang diperbolehkan 0.2 detik, sedangkan waktu CB menutup kembali 0.9 detik setelah gangguan dihilangkan berdasarkan standar yang diperbolehkan PLN.



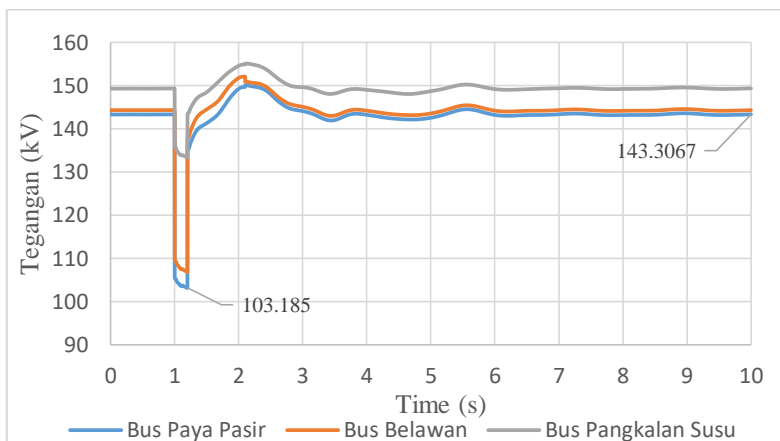
Gambar 4.61 Respon respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah Paya Pasir-Belawan

Pada gambar 4.61 respon sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada generator PLTG Paya Pasir nilai awal simulasi mencapai 16.61 *degree* dan mengalami osilasi hingga *steady state* pada 16.31 *degree*. Pada generator PLTU Belawan 1 simulasi awal 11.23 *degree* menjadi 12.63 *degree* dan selanjutnya pada generator Pangkalan Susu nilai awal simulasi 34.8 *degree* menjadi 34.7 *degree*. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa respon sudut rotor dalam keadaan stabil.



Gambar 4.62 Respon respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah Paya Pasir-Belawan

Pada gambar 4.62 dapat dilihat, pada bus paya pasir mengalami kenaikan sebesar 50.2 Hz dan dapat kembali ke kondisi *steady state* pada 49.99 Hz. Begitu pula dengan PLTU Belawan 1 dan Pangkalan Susu 1 yang kembali ke kondisi *steady state* pada 49.99 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

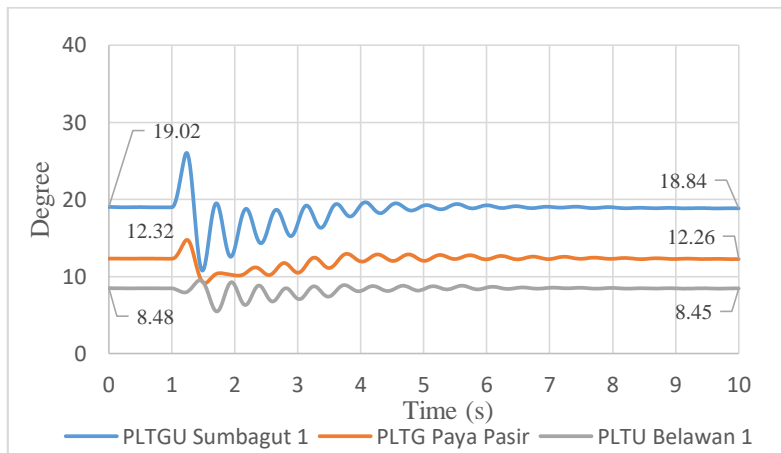


Gambar 4.63 Respon respon tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah Paya Pasir-Belawan

Pada gambar 4.63 dapat dilihat ketika ada hubung singkat 1 fasa ketanah pada bus gangguan Paya Pasir mengalami penurunan sebesar 103.185 kV atau 68,79 % dari tegangan nominalnya 150 kV. Waktu kedip tegangan yang diperbolehkan menurut standar *voltage sag* SEMI F47 selama 0.2 detik setelah gangguan saat penurunan tegangan 50 % sampai 70 % dari tegangan nominalnya. Tegangan pada bus Paya Pasir dapat kembali ke kondisi *steady state* saat detik ke-10 sebesar 143,3 kV dan masih dalam range standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV sampai 157.5

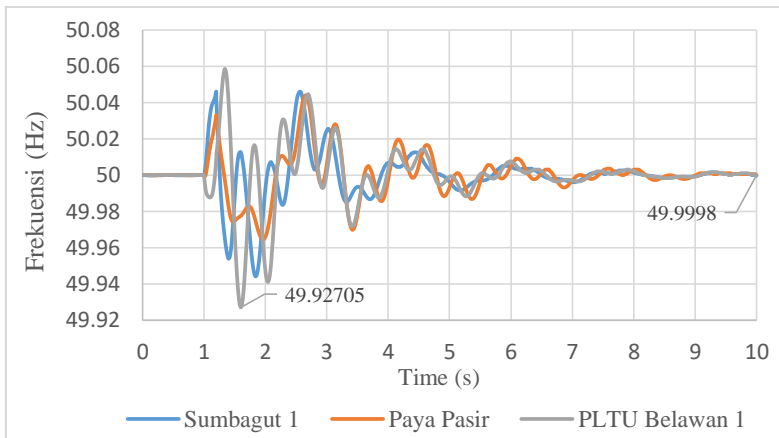
4.5.4 Kondisi Beban Normal, pada Saluran Sei Rotan-Percut (HS 1 Fasa)

Pada kondisi normal, nilai arus hubung singkat 1 fasa kenah terbesar pertama pada saluran yang menghubungkan Sei Rotan ke Percut dengan nilai hubung singkat 39.004 kA. Pada kondisi beban normal waktu *trip* CB adalah 0.2 detik setelah gangguan kerana berdasarkan standar *voltage sag* (SEMI F47) saat ketip tegangan tegangan turun hingga 50% sampai 70% dari tegangan nominalnya 150 kV maka yang diperbolehkan 0.2 detik, sedangkan waktu CB menutup kembali 0.9 detik setelah gangguan dihilangkan berdasarkan standar yang diperbolehkan PLN.



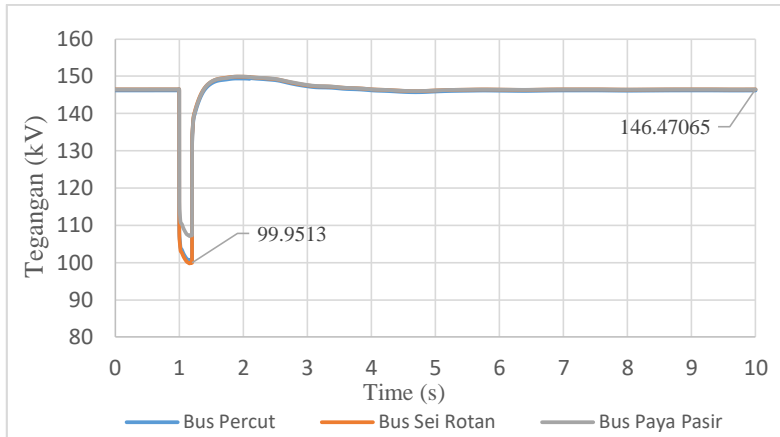
Gambar 4.64 Respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah Sei Rotan-Percut

Pada gambar 4.64 respon sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat kembali ke kondisi *steady state*. Pada generator PLTGU Sumbagut 1 nilai awal simulasi 19.02 *degree* dan dapat kembali *steady state* pada 18.84 *degree*. Pada generator PLTG Paya Pasir awal simulasi 12.32 *degree* kembali ke kondisi *steady state* pada 12.26 *degree* dan selanjutnya PLTGU Belawan 1 dari 8.48 *degree* dan *steady state* pada 8.45 *degree*. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa respon sudut rotor dalam keadaan stabil.



Gambar 4.65 Respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah Sei Rotan-Percut

Pada gambar 4.65 dapat dilihat ketika hubung singkat satu fasa ketanah maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil hingga mencapai *steady state*. Seperti pada bus PLTU Belawan 1 terjadi penurunan 49.92 Hz dan terus berosilasi tetapi dengan nilai yang kecil sehingga kembali ke kondisi *steady state* pada 49.99 Hz. Begitu pula pada bus Paya Pasir dan PLTU Belawan 1 yang kembali *steady state* pada 49.99 Hz. Sehingga, dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

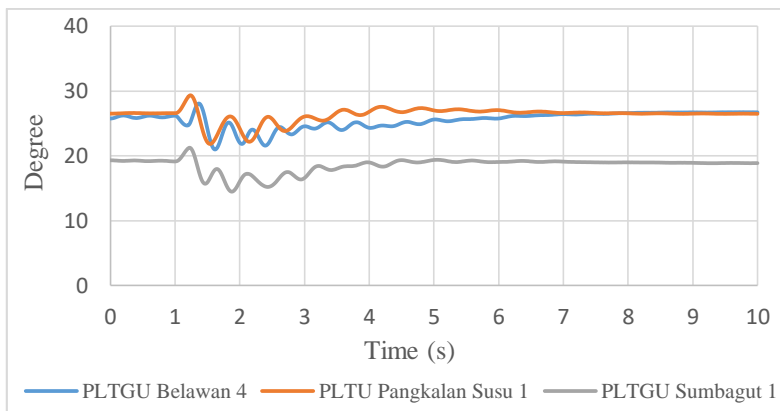


Gambar 4.66 Respon Tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah sei rotan-percut

Pada gambar 4.66 dapat dilihat ketika ada hubung singkat 1 fasa ketanah pada bus gangguan Sei Rotan mengalami penurunan sebesar 99.9513 kV atau 66.63 % dari tegangan nominalnya 150 kV. Waktu kedip tegangan yang diperbolehkan menurut standar *voltage sag* SEMI F47 selama 0.2 detik setelah gangguan saat penurunan tegangan 50 % sampai 70 % dari tegangan nominalnya. Tegangan pada bus Sei Rotan dapat kembali ke kondisi *steady state* saat detik ke-10 sebesar 146.4 kV dan masih dalam range standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV sampai 157.5 kV.

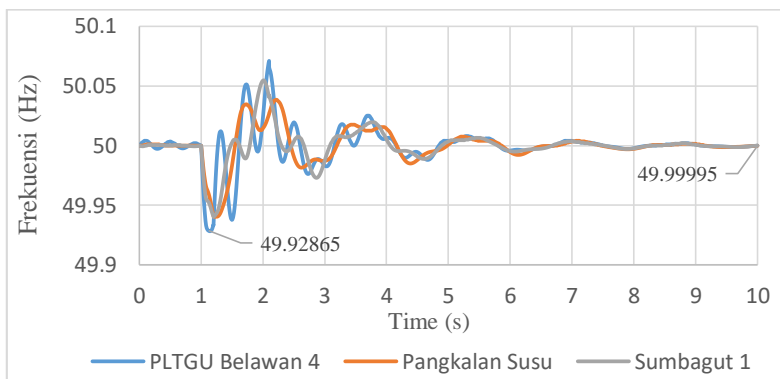
4.5.5 Kondisi Beban Normal, pada Saluran PLTGU Belawan-Sei Rotan (HS 1 Fasa)

Pada kondisi normal, nilai arus hubung singkat 1 fasa kenah terbesar kedua pada saluran yang menghubungkan PLTGU Belawan ke Sei Rotan dengan nilai hubung singkat 33.744 kA. Pada kondisi beban normal waktu *trip* CB adalah 0.2 detik setelah gangguan karena berdasarkan standar *voltage sag* (SEMI F47) saat ketip tegangan tegangan turun hingga 50% sampai 70% dari tegangan nominalnya 150 kV maka yang diperbolehkan 0.2 detik, sedangkan waktu CB menutup kembali 0.9 detik setelah gangguan dihilangkan berdasarkan standar yang diperbolehkan PLN.



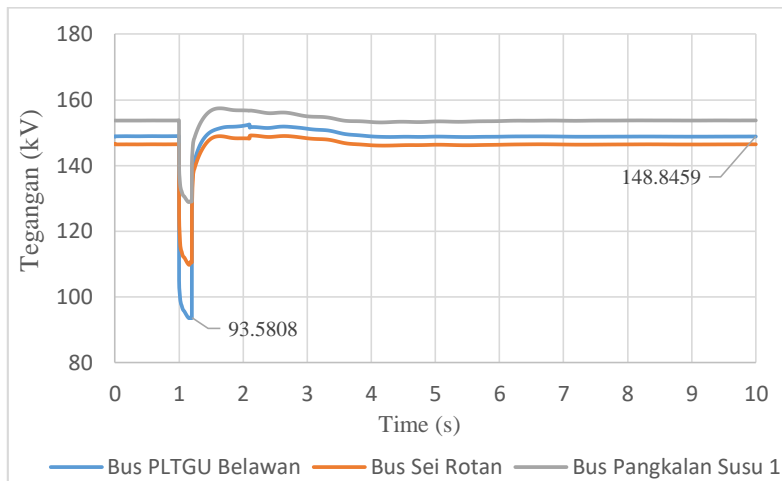
Gambar 4.67 Respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan-Sei Rotan

Pada gambar 4.67 respon sudut rotor semua generator mengalami osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat kembali ke kondisi *steady state*. Seperti pada generator Sumbagut 1 nilai awal simulasi 19.34 *degree* dan berosilasi hingga *steady state* pada 18.9 *degree*, pada generator PLTU Pangkalan Susu 1 nilai awal simulasi 26.54 *degree* dan kembali ke kondisi *steady state* pada 26.51 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa respon sudut rotor dalam keadaan stabil.



Gambar 4.68 Respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan-Sei Rotan

Pada gambar 4.68 dapat dilihat ketika hubung singkat satu fasa ketanah maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil hingga mencapai *steady state*. Seperti pada bus PLTU Belawan 4 terjadi penurunan 49.92 Hz dan terus berosilasi tetapi dengan nilai yang kecil sehingga kembali ke kondisi *steady state* pada 49.99 Hz. Begitu pula pada bus Pangkalan Susu dan Sumbagut 1 yang kembali *steady state* pada 49.99 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

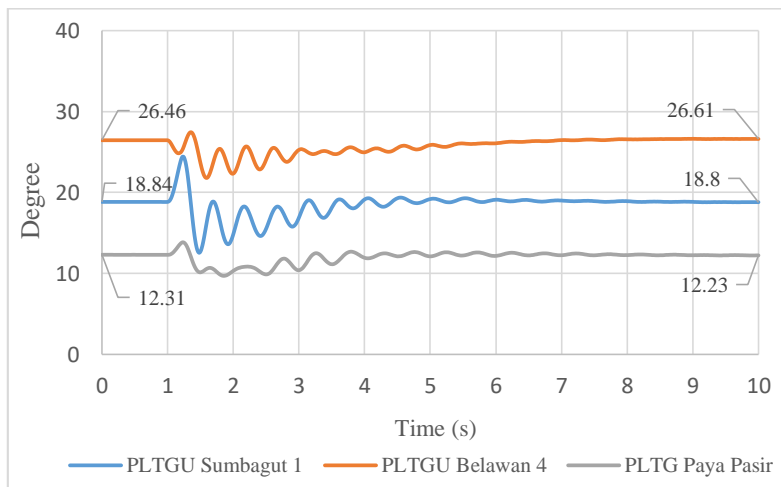


Gambar 4.69 Respon tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah PLTGU Belawan-Sei Rotan

Pada gambar 4.69 dapat dilihat ketika ada hubung singkat 1 fasa ketanah pada bus gangguan PLTGU Belawan mengalami penurunan sebesar 99.5808 kV atau 66.38% dari tegangan nominalnya 150 kV. Waktu kedip tegangan yang diperbolehkan menurut standar *voltage sag* SEMI F47 selama 0.2 detik setelah gangguan saat penurunan tegangan 50 % sampai 70 % dari tegangan nominalnya. Tegangan pada bus PLTGU Belawan dapat kembali ke kondisi *steady state* saat detik ke-10 sebesar 148.84 kV dan masih dalam range standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV sampai 157.5 kV.

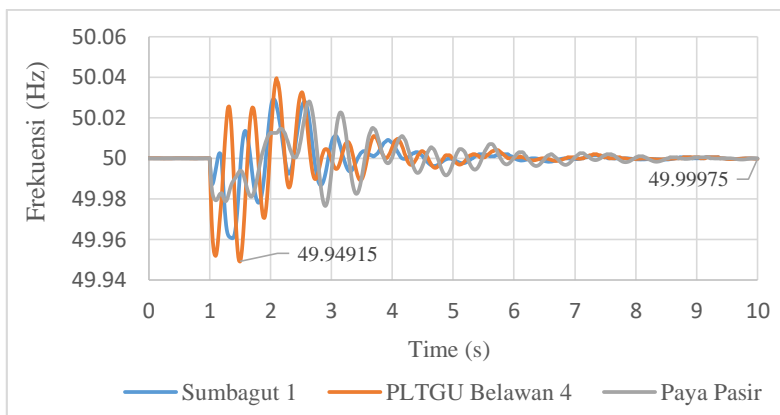
4.5.6 Kondisi Beban Normal, pada Saluran KIM-Percut (HS 1 Fasa)

Pada kondisi normal, nilai arus hubung singkat 1 fasa kenah terbesar kedua pada saluran yang menghubungkan KIM ke Percut dengan nilai hubung singkat 30.651 kA. Pada kondisi beban normal waktu *trip* CB adalah 0.2 detik setelah gangguan karena berdasarkan standar *voltage sag* (SEMI F47) saat ketip tegangan tegangan turun hingga 50% sampai 70% dari tegangan nominalnya 150 kV maka yang diperbolehkan 0.2 detik, sedangkan waktu CB menutup kembali 0.9 detik setelah gangguan dihilangkan berdasarkan standar yang diperbolehkan PLN.



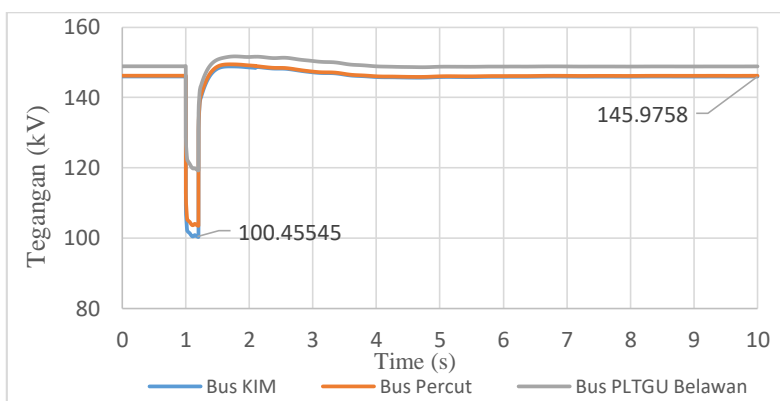
Gambar 4.70 Respon sudut rotor, ketika HS 1 fasa ketanah KIM-Percut

Pada gambar 4.70 respon sudut rotor semua generator mengalami osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat kembali ke kondisi *steady state*. Seperti pada generator Sumbagut 1 nilai awal simulasi 18.84 *degree* dan berosilasi hingga *steady state* pada 18.8 *degree*, pada generator PLTGU Belawan 4 nilai awal simulasi 26.46 *degree* dan kembali ke kondisi *steady state* pada 26.61 *degree*. Dan pada generator Paya Pasir nilai awal simulasi 12.31 *degree* dan kembali ke kondisi *steady state* pada 12.23 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa respon sudut rotor dalam keadaan stabil.



Gambar 4.71 Respon frekuensi, ketika HS 1 fasa ketanah KIM-Percut

Pada gambar 4.71 dapat dilihat ketika hubung singkat satu fasa ketanah maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi dengan nilai yang kecil hingga mencapai *steady state*. Seperti pada bus PLTU Belawan 4 terjadi penurunan 49.94 Hz dan terus berosilasi tetapi dengan nilai yang kecil sehingga kembali ke kondisi *steady state* pada 49.99 Hz. Begitu pula pada bus Sumbagut 1 dan Paya Pasir yang kembali *steady state* pada 49.99 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam keadaan stabil, berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.



Gambar 4.72 Respon tegangan, ketika HS 1 fasa ketanah KIM-Percut

Pada gambar 4.72 dapat dilihat ketika ada hubung singkat 1 fasa ketanah pada bus gangguan KIM mengalami penurunan sebesar 100.4 kV atau 66.97% dari tegangan nominalnya 150 kV. Waktu kedip tegangan yang diperbolehkan menurut standar *voltage sag* SEMI F47 selama 0.2 detik setelah gangguan saat penurunan tegangan 50 % sampai 70 % dari tegangan nominalnya. Tegangan pada bus KIM dapat kembali ke kondisi *steady state* saat detik ke-10 sebesar 145.9 kV dan masih dalam range standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV sampai 157.5 kV.

4.6 Critical Clearing Time (CCT)

Critical Clearing Time atau pemutusan waktu kritis yang disebabkan karena gangguan tiga fasa dan percobaan ini dilakukan pada nilai arus hubung singkat tiga fasa ketanah yang paling besar selanjutnya akan dicari waktu pemutusan kritisnya yaitu diantara kondisi stabil dan tidak stabil. Untuk menentukan waktu pemutusan kritis menggunakan metode *time domain simulation*. Untuk memaksimalkan keakuratan maka akan digunakan waktu pemutusan kritis tiga angka dibelakang koma.

Pada kasus *Critical Clearing Time* pada tugas akhir ini memperhatikan respon stabil pada sudut rotor dan frekuensi. Respon sudut rotor dikatakan stabil jika tidak melebihi batas kestabilan transient yaitu 180 *degree* atau jika gangguan segera dihilangkan mesin akan tetap sinkron dikarenakan osilasi ayunan menurun menetap dibawah 90 *degree*. Dan respon sudut rotor dikatakan tidak stabil jika hingga akhir simulasi akan terus *slipping pole* melebihi batas kestabilan transient yaitu 180 *degree* dan tidak dapat kembali menurun menetap dibawah 90 *degree*. Sedangkan pada respon frekuensi menggunakan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz. Percobaan *Critical Clearing Time* dilakukan pada kondisi beban *peak* dan normal masing-masing 3 kali percobaan.

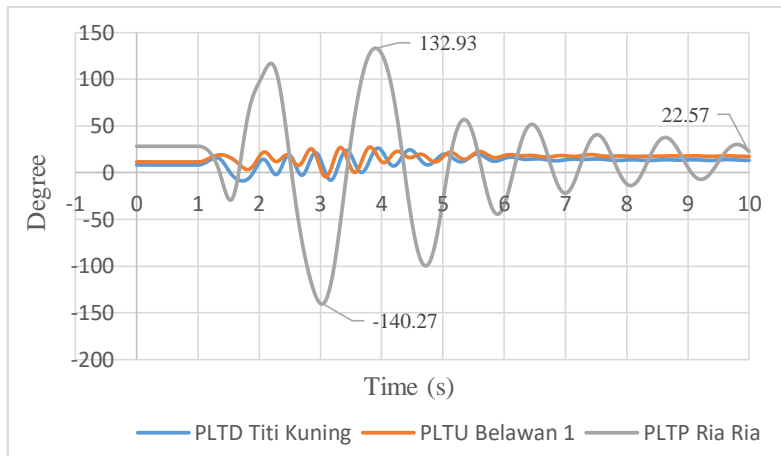
4.6.1 Kondisi Beban Peak, HS 3 fasa Bus Sei Rotan

Pada kondisi *peak*, nilai arus hubung singkat 3 fasa terbesar pertama pada bus sei rotan yaitu pada saluran yang menghubungkan bus sei rotan ke percut dengan nilai arus 87.697 kA. Sehingga dicari waktu pemutusan kritis yaitu antara kondisi stabil dan tidak stabil dengan memperhatikan respon sudut rotor dan frekuensi.

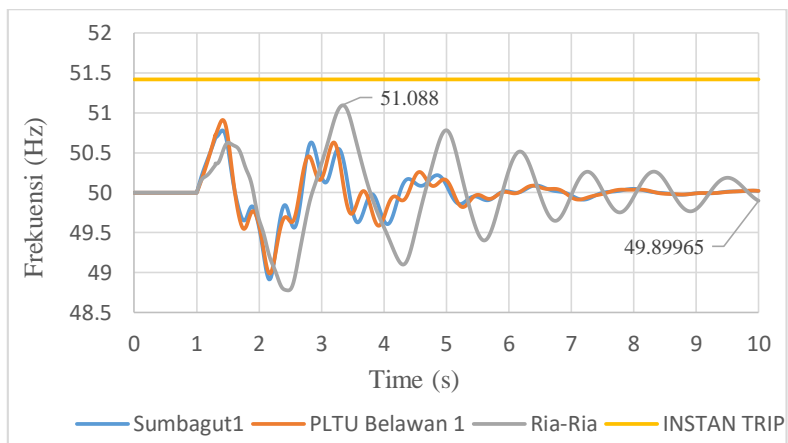
Pada saluran Sei Rotan ke Percut pada saat detik ke 0.300 detik respon sudut rotor dan frekuensi stabil sedangkan saat 0.301detik respon

sudut rotor tidak stabil dan respon frekuensi tetap stabil. Sehingga dapat disimpulkan waktu pemutusan kritis yang direkomendasikan saat range aman dan tidak aman adalah 0.300-0.301 detik. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut :

a. Saat Kondisi *Peak*, CB open 0.300 detik (HS 3 Fasa di Sei Rotan)



Gambar 4.73 Respon sudut rotor stabil saat CB *open* 0.300 detik

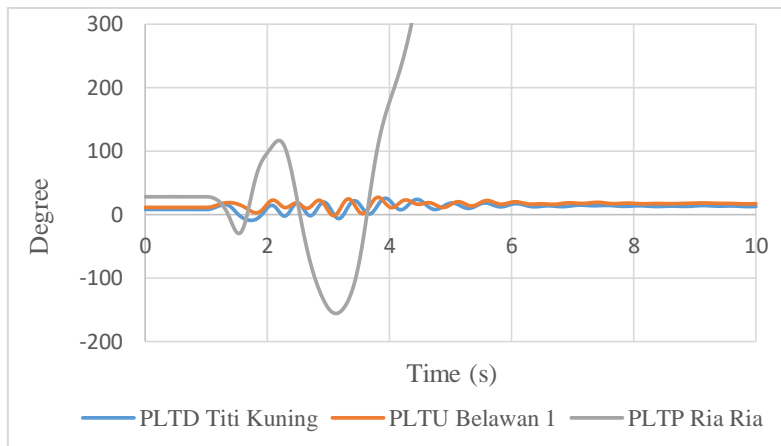


Gambar 4.74 Respon frekuensi stabil saat CB *open* 0.300 detik

Pada gambar 4,73 dapat dilihat respon sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi tetapi dapat kembali ke kondisi *steady state*. Seperti pada generator PLTP Ria-Ria mengalami osilasi penurunan sebesar -140.27 *degree* dengan kenaikan maksimal sebesar 132.93 *degree* dan *steady state* pada detik ke-10 sebesar 22.57 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa respon sudut rotor stabil karena hingga akhir simulasi respon sudut rotor *steady state* kurang dari 90 *degree*, hal ini berdasarkan standar IEEE Std 399-1980.

Pada gambar 4.74 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi tidak melebihi batas standar dilarang yaitu 51.417 Hz. Osilasi terbesar terdapat pada bus Ria-Ria mencapai kondisi kritis yang nilainya 51.088 Hz dan menurun hingga mencapai *steady state* pada detik ke-10 sebesar 49.89 Hz masih dalam batas standar frekuensi *continuous operating range* 49.583-50.417 Hz berdasarkan standar standar IEEE Std C37.106-2003.

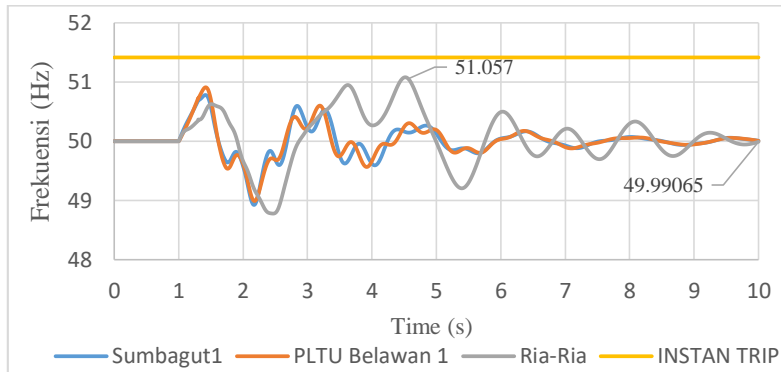
b. Saat Kondisi *Peak*, CB open 0.301 detik (HS 3 Fasa di Sei Rotan)



Gambar 4.75 Respon sudut rotor tidak stabil saat CB *open* 0.301 detik

Pada gambar 4.75 respon sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi. Pada generator PLTD Titi Kuning dan PLTU Belawan respon sudut rotor mengalami osilasi tetapi dengan ayunan kecil dan dapat kembali *steady state* dibawah 90 *degree*. Sedangkan pada generator

PLTP Ria-Ria lepas sinkron dan akan terus meningkat melebihi 180 *degree* dan tidak dapat kembali menurun dibawah 90 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor tidak stabil.



Gambar 4.76 Respon frekuensi stabil saat CB open 0.301 detik

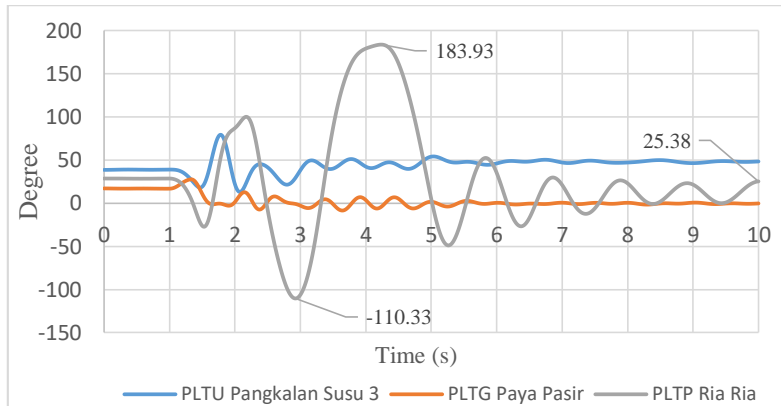
Pada gambar 4.76 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi tidak melebihi batas standar dilarang yaitu 51.417 Hz. Osilasi terbesar terdapat pada bus Ria-Ria kenaikan maksimal 51.057 Hz, dibawah standart yang dilarang dan menurun hingga mencapai *steady state* pada 49.99 Hz masih dalam batas standar frekuensi *continuous operating range* 49.583-50.417 Hz berdasarkan standar standar IEEE Std C37.106-2003.

4.6.2 Kondisi Beban *Peak*, HS 3 fasa Bus Paya Geli

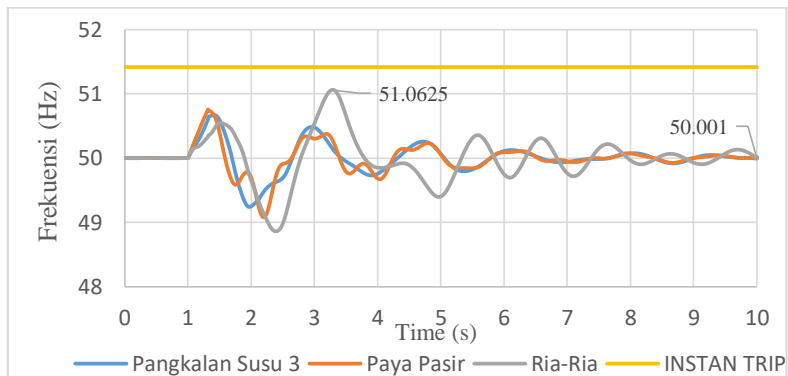
Pada kondisi peak, nilai arus hubung singkat 3 fasa terbesar kedua pada bus Paya Geli yaitu pada saluran yang menghubungkan bus Binjai ke Paya Geli dengan nilai arus 74.306 kA. Sehingga dicari waktu pemutusan kritis yaitu antara kondisi stabil dan tidak stabil dengan memperhatikan respon sudut rotor dan frekuensi.

Pada saluran paya Geli-Binjai pada saat detik ke 0.321 respon sudut rotor dan frekuensi stabil sedangkan saat 0.322, respon sudut rotor tidak stabil dan respon frekuensi tetap stabil. Sehingga dapat disimpulkan waktu pemutusan kritis yang direkomendasikan saat range aman dan tidak aman adalah 0.321-0.322 detik. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut :

a. Saat Kondisi *Peak*, CB open 0.321 detik (HS 3 Fasa di Paya Geli)



Gambar 4.77 Respon sudut rotor stabil saat CB *open* 0.321 detik

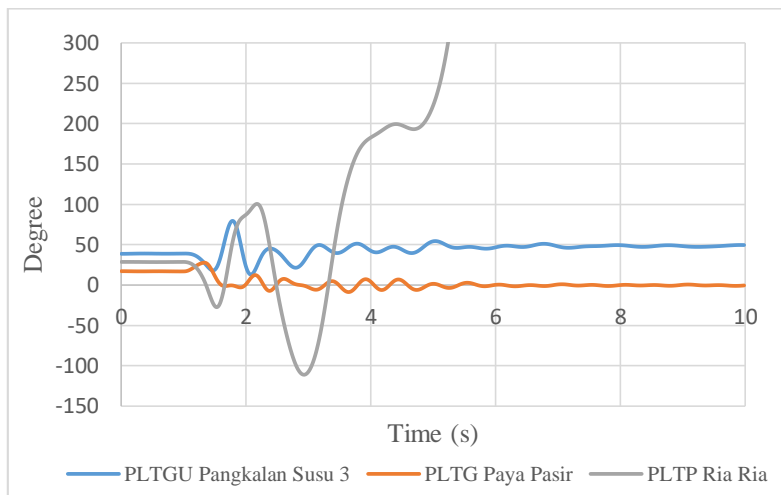


Gambar 4.78 Respon frekuensi stabil saat CB *open* 0.321 detik

Pada gambar 4,77 dapat dilihat respon sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi tetapi dapat kembali ke kondisi *steady state*. Seperti pada generator PLTP Ria-Ria mengalami osilasi penurunan sebesar -110.33 *degree* dengan kenaikan maksimal sebesar 183.93 *degree* dan *steady state* pada detik ke-10 sebesar 25,38 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa respon sudut rotor stabil karena hingga akhir simulasi respon sudut rotor *steady state* kurang dari 90 *degree*, hal ini berdasarkan standar IEEE Std 399-1980.

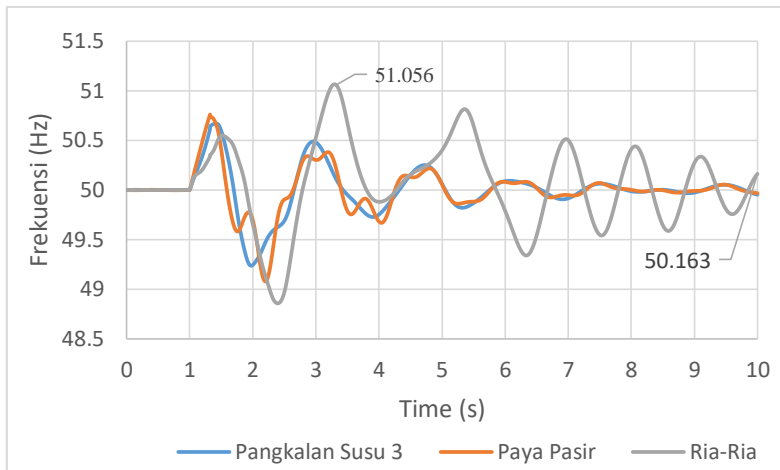
Pada gambar 4.78 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi tidak melebihi batas standar dilarang yaitu 51.417 Hz. Osilasi terbesar terdapat pada bus Ria-Ria mencapai kondisi kritis yang nilainya 51.0625 Hz dan menurun hingga mencapai *steady state* pada detik ke-10 sebesar 50.001 Hz. Jadi, disimpulkan, respon frekuensi dalam kondisi stabil karena *steady state* pada nilai *continuous operating range* 49.583-50.417 Hz berdasarkan standar standar IEEE Std C37.106-2003.

b. Saat Kondisi *Peak*, CB open 0.322 detik (HS 3 Fasa di Paya Geli)



Gambar 4.79 Respon sudut rotor tidak stabil saat CB *open* 0.322 detik

Pada gambar 4.79 respon sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi. pada generator pangkalan susu 3 dan PLTG paya pasir mengalami osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat *steady state* dibawah 90 *degree*, sedangkan pada generator PLTP Ria-Ria respon sudut rotor meningkat hingga melebihi 180 *degree*, dan akan terus meningkat karena gangguan tidak segera dihilangkan yang menyebabkan generator Ria-Ria keluar dari sinkronisasi sistem. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor tidak stabil.



Gambar 4.80 Respon frekuensi stabil saat CB *open* 0.322 detik

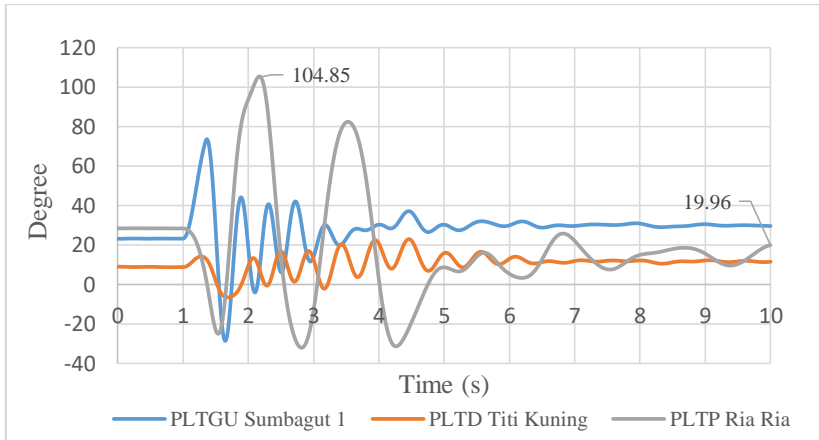
Pada gambar 4.80 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi tidak melebihi batas standar dilarang yaitu 51.417 Hz. Osilasi terbesar terdapat pada bus Ria-Ria mencapai kondisi kritis yang nilainya 51.056 Hz dan menurun hingga mencapai *steady state* pada detik ke-10 sebesar 50.163 Hz. Jadi, disimpulkan, respon frekuensi dalam kondisi stabil karena *steady state* pada nilai *continuous operating range* 49.583-50.417Hz berdasarkan standar standar IEEE Std C37.106-2003.

4.6.3 Kondisi Beban *Peak*, HS 3 fasa Bus Titi Kuning

Pada kondisi *peak*, nilai arus hubung singkat 3 fasa terbesar ketiga pada bus titi kuning yaitu pada saluran yang menghubungkan bus Titi Kuning-Sei Rotan dengan nilai arus 72.895 kA. Sehingga dicari waktu pemutusan kritis yaitu antara kondisi stabil dan tidak stabil dengan memperhatikan respon sudut rotor dan frekuensi.

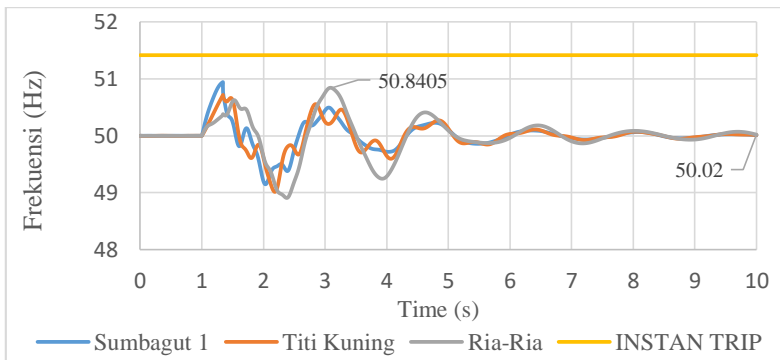
Pada saluran Titi Kuning-Sei Rotan pada saat detik ke 0.343 respon sudut rotor dan frekuensi stabil sedangkan saat detik ke 0.344 respon sudut rotor tidak stabil tetapi respon frekuensi tetap stabil. Sehingga dapat disimpulkan waktu pemutusan kritis yang direkomendasikan adalah saat range aman dan tidak aman adalah 0.343-0.344 detik. Hasil simulasi dapat dilihat sebagai berikut :

a. Saat Kondisi *Peak*, CB open 0.343 detik (HS 3 Fasa di Titi Kuning)



Gambar 4.81 Respon sudut rotor stabil saat CB *open* 0.343 detik

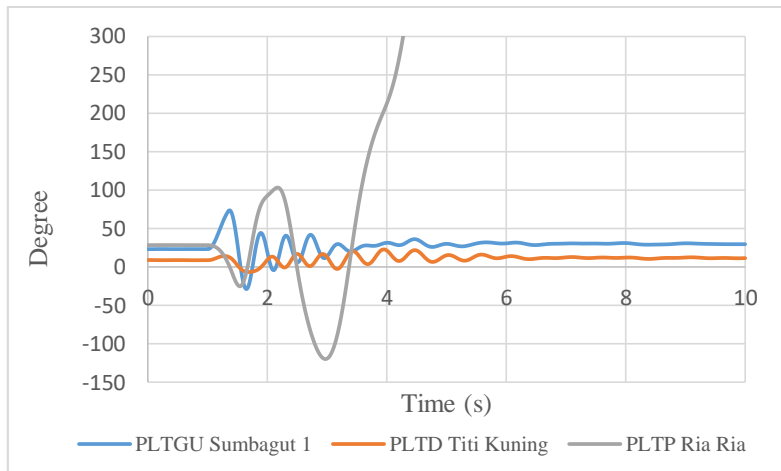
Pada gambar 4.81 dapat dilihat respon sudut rotor pada pada semua generator mengalami osilasi tetapi dapat kembali ke kondisi *steady state*. Seperti pada generator PLTP Ria-Ria mengalami osilasi kenaikan maksimal sebesar 104.85 *degree* dan *steady state* pada detik ke-10 sebesar 19.96 *degree*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa respon sudut rotor stabil karena hingga akhir simulasi respon sudut rotor *steady state* kurang dari 90 *degree*, berdasarkan standar IEEE Std 399-1980.



Gambar 4.82 Respon frekuensi stabil saat CB *open* 0.343 detik

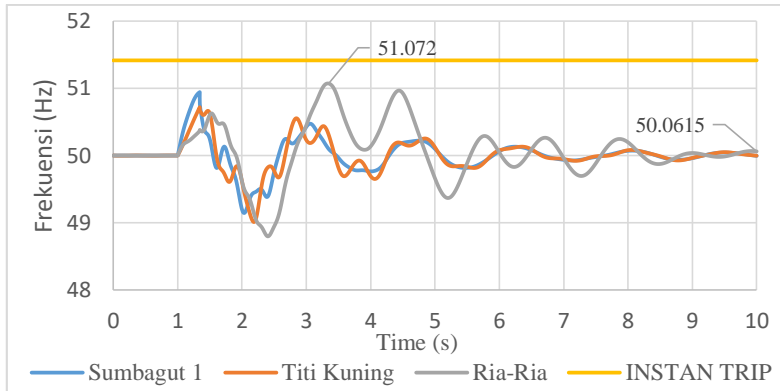
Pada gambar 4.82 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi tidak melebihi batas standar yang dilarang yaitu 51.417 Hz. Pada bus Ria-Ria kenaikan maksimal sebesar 50.84 Hz dan mengalami penurunan hingga *steady state* pada detik ke-10 sebesar 50.02 Hz sama hal nya dengan bus Sumbagut 1 Dan Titi Kuning yang *steady state* pada 50 Hz. Sehingga dapat disimpulkan, respon frekuensi dalam keadaan stabil. Berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu *continuous operation range* 49.583-50.417 Hz.

a. Saat Kondisi *Peak*, CB open 0.344 detik (HS 3 Fasa di Titi Kuning)



Gambar 4.83 Respon sudut rotor tidak stabil saat CB *open* 0.344 detik

Pada gambar 4.83 respon sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi. Pada generator Sumbagut dan PLTD Titi Kuning mengalami osilasi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat kembali *steady state* di bawah 90 *degree*. Sedangkan pada generator PLTP Ria-Ria respon sudut rotor meningkat hingga melebihi batas kestabilan yaitu 180 *degree* maka terjadi slip pole dan terus meningkat karena gangguan tidak segera dihilangkan maka generator Ria-Ria keluar dari sinkronisasi sistem. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor tidak stabil.



Gambar 4.84 Respon frekuensi stabil saat CB *open* 0.344 detik

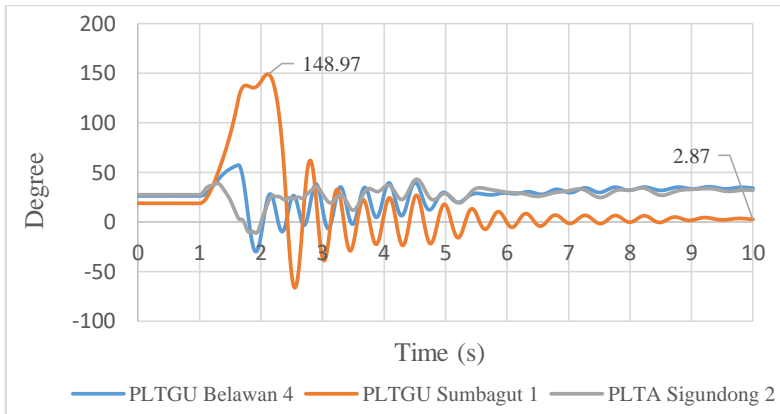
Pada gambar 4.84 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi tidak melebihi batas standar. Kenaikan respon frekuensi maksimal terdapat ppada bus Ria-Ria sebesar 51.072 Hz, masih dibawah batas nilai standar frekuensi yang dilarang yaitu 51.417 Hz. Hal ini berdasarkan standar IEEE Std C37.106-2003. Kenaikan respon frekuensi akan menurun dan kembali ke kondisi *steady state* pada detik ke-10 sebesar 50.061 Hz. Sehingga dapat disimpulkan respon frekuensi dalam kondisi stabil dikarenakan *steady state* pada nilai *continuous operating range* 49.583-50.417 Hz.

4.6.4 Kondisi Beban Normal, HS 3 fasa Bus Sei Rotan

Pada kondisi normal, nilai arus hubung singkat 3 fasa terbesar pertama pada bus Sei Rotan yaitu pada saluran yang menghubungkan bus Sei Rotan Ke Percut dengan nilai arus 87.899 kA. Sehingga dicari waktu pemutusan kritis yaitu antara kondisi stabil dan tidak stabil dengan memperhatikan respon sudut rotor dan frekuensi.

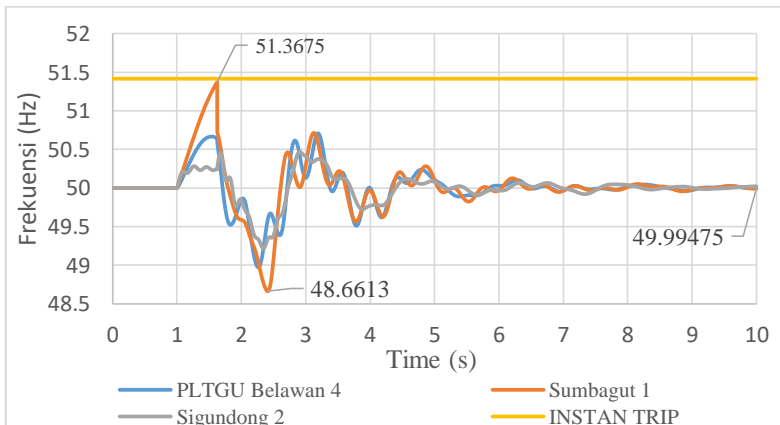
Pada saluran Sei Rotan ke Percut pada saat detik ke 0.625 respon sudut rotor dan frekuensi stabil sedangkan saat detik ke 0.626 respon sudut rotor tidak stabil tetapi respon frekuensi tetap stabil. Sehingga dapat disimpulkan waktu pemutusan kritis yang direkomendasikan saat range aman dan tidak aman adalah 0.625-0.626 detik dikarenakan respon sudut rotor dan frekuensi dalam range aman. Hasil simulasi *Critical Clearing Time* (CCT) dapat dilihat sebagai berikut :

a. Saat Kondisi Normal, CB open 0.625 detik (HS 3 Fasa di Sei Rotan)



Gambar 4.85 Respon sudut rotor stabil saat CB *open* 0.625 detik

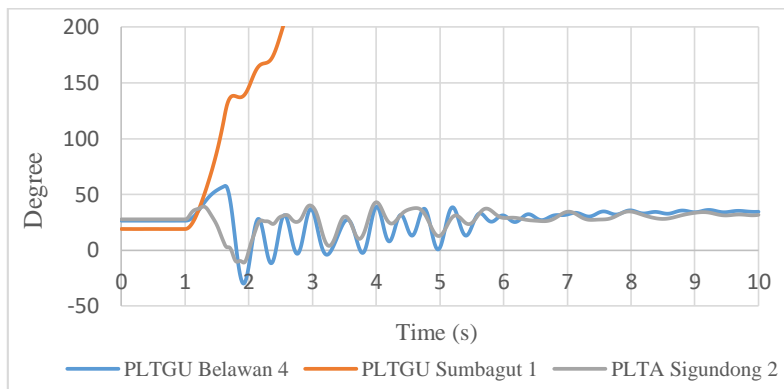
Pada gambar 4.85 dapat dilihat respon sudut rotor pada pada semua generator mengalami osilasi tetapi tidak melebihi batas kestabilan yaitu 180 *degree* dan *steady state* pada 90 *degree*. generator Sumbagut 1 mengalami osilasi terbesar 148.97 *degree* dan menurun hingga *steady state* pada detik ke-10 sebesar 2.87 *degree*. Sehingga respon sudut rotor stabil.



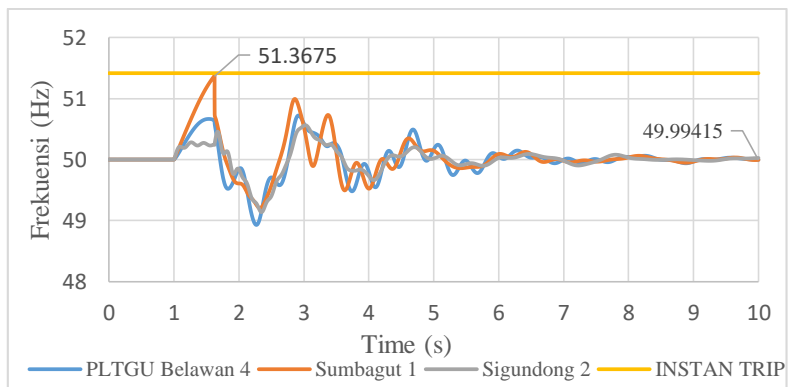
Gambar 4.86 Respon frekuensi stabil saat CB *open* 0.625 detik

Pada gambar 4.86 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi tidak melebihi batas standar dilarang yaitu 51.417 Hz. Osilasi terbesar terdapat pada bus Sumbagut 1 mencapai kondisi kritis yang nilainya 51.367 Hz masih dibawah standar respon frekuensi yang dilarang dan mengalami menurun hingga mencapai *steady state* pada detik ke-10 sebesar 49.994 Hz masih dalam batas standar frekuensi *continuous operating range* 49.583-50.417 Hz berdasarkan standar standar IEEE Std C37.106-2003.

b. Saat Kondisi Normal, CB open 0.626 detik (HS 3 Fasa di Sei Rotan)



Gambar 4.87 Respon sudut rotor tidak stabil saat CB *open* 0.626 detik



Gambar 4.88 Respon sudut rotor saat CB *open* 0,626 detik

Pada gambar 4.87 respon sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi. Pada generator PLTGU Belawan 4 dan PLTA Sigundong 2 mengalami osilasi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat kembali *steady state* di bawah 90 *degree*. Sedangkan pada generator PLTGU Sumbagut 1 respon sudut rotor meningkat hingga melebihi batas kestabilan yaitu 180 *degree* maka terjadi slip pole dan terus meningkat karena gangguan tidak segera dihilangkan maka generator PLTGU Sumbagut 1 keluar dari sinkronisasi sistem. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor tidak stabil.

Pada gambar 4.88 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi tidak melebihi batas standar dilarang yaitu 51.417 Hz. Osilasi terbesar terdapat pada bus Sumbagut 1 mencapai kondisi kritis yang nilainya 51.367 Hz dan menurun hingga mencapai *steady state* pada detik ke-10 sebesar 49.994 Hz masih dalam batas standar frekuensi *continuous operating range* 49.583-50.417 Hz berdasarkan standar standar IEEE Std C37.106-2003.

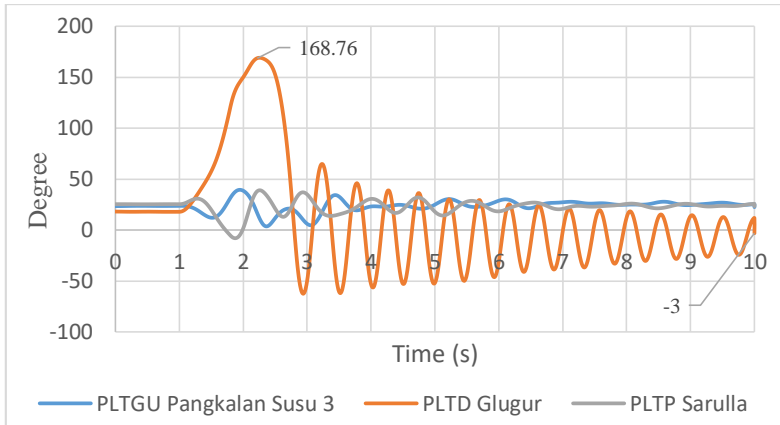
4.6.5 Kondisi Beban Normal, HS 3 fasa Bus Paya Geli

Pada kondisi normal, nilai arus hubung singkat 3 fasa terbesar kedua pada bus Paya Geli yaitu pada saluran yang menghubungkan bus Binjai ke Paya Geli dengan nilai arus 74.158 kA. Sehingga dicari waktu pemutusan kritis yaitu antara kondisi stabil dan tidak stabil dengan memperhatikan respon sudut rotor dan frekuensi.

Pada saluran Binjai ke Paya Geli saat terjadi hubung singkat pada bus Paya Geli maka waktu pemutusan kritisnya 0.799-1.800 detik. Pada 0.799 detik respon sudut rotor stabil sedangkan respon frekuensi tidak stabil sedangkan saat 1.800 detik respon sudut rotor tidak stabil dan respon frekuensi tidak stabil. Maka dapat disimpulkan saat 0.799-0.800 detik sistem tidak stabil sehingga perlu dicari waktu pemutusan ulang agar didapatkan waktu pemutusan yang tepat saat respon sudut rotor dan frekuensi pada range aman.

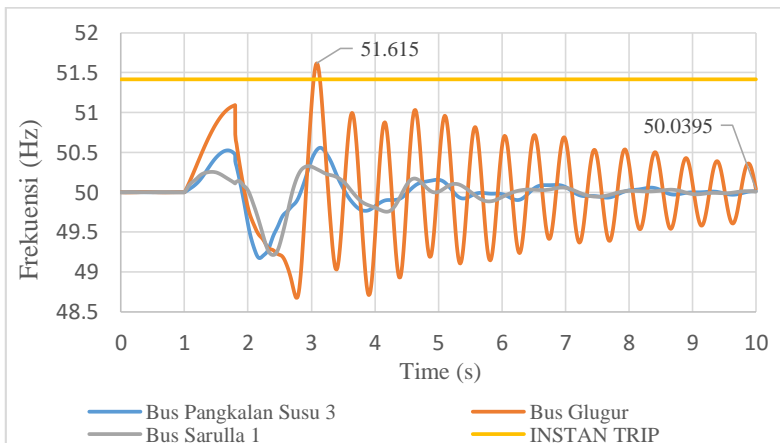
Pada waktu pemutusan kritis saat Binjai ke Paya Geli yaitu 0.796-0.797 detik. Saat 0.796 detik respon sudut rotor stabil dan respon frekuensi sabil sedangkan saat 0.797 detik respon sudut rotor stabil dan respon frekuensi tidak stabil. Rekomendasi waktu pemutusan kritis yang tepat saat CB open 0.796-0.797 detik. Hasil Simulasi dapat dilihat sebagai berikut :

a. Saat Kondisi Normal, CB open 0.799-1.800 detik (HS 3 Fasa di Paya Geli)



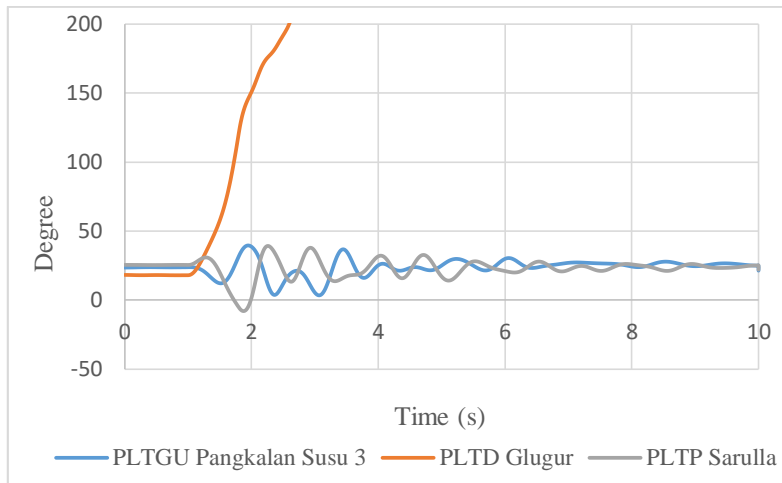
Gambar 4.89 Respon sudut rotor stabil saat CB *open* 0.799 detik

Pada gambar 4.90 respon sudut rotor semua generator mengalami osilasi. Pada PLTD Glugur respon sudut rotor mengalami kenaikan maksimal sebesar 168.76 dan pada detik ke-10 *steady state* -3. Jadi, dapat disimpulkan respon sudut rotor stabil.



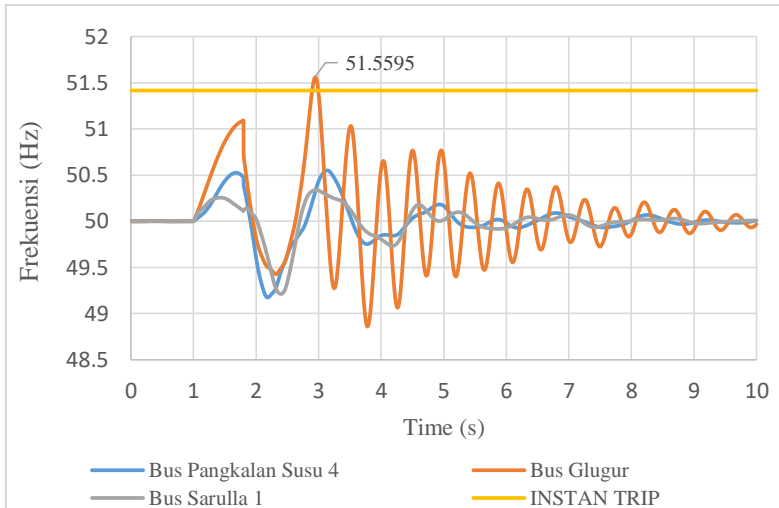
Gambar 4.90 Respon frekuensi tidak stabil saat CB *open* 0.799 detik

Pada gambar 4.90 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi. Pada bus PLTD Glugur kenaikan maksimal 51.615 Hz artinya melebihi batas standar yang dilarang yaitu 51.417 Hz menurut batas standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003. Maka dapat disimpulkan respon frekuensi tidak stabil.



Gambar 4.91 Respon sudut rotor tidak stabil saat CB *open* 0.800 detik

Pada gambar 4.91 respon sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi. Pada generator PLTD Glugur respon sudut rotor meningkat hingga melebihi batas kestabilan yaitu 180 *degree* maka terjadi slip pole dan terus meningkat karena gangguan tidak segera dihilangkan yang menyebabkan generator PLTD Glugur keluar dari sinkronisasi sistem. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor tidak stabil.

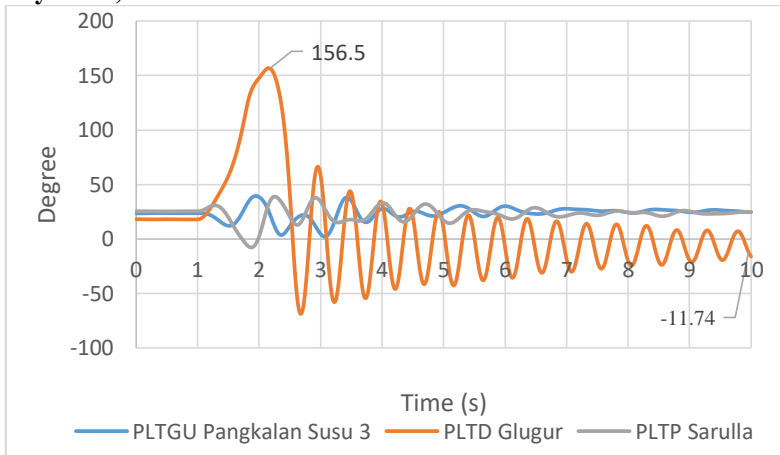


Gambar 4.92 Respon frekuensi tidak stabil saat CB *open* 0.800 detik

Pada gambar 4.92 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi. Pada bus PLTD Glugur kenaikan maksimal 51.559 Hz yang artinya melebihi batas standar yang dilarang yaitu 51.417 Hz menurut batas standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003. Maka dapat disimpulkan respon frekuensi tidak stabil.

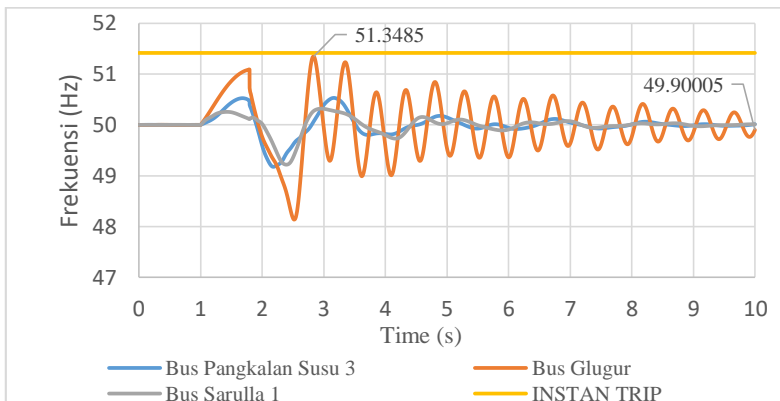
Dari hasil simulasi dapat disimpulkan saat waktu pemutusan kritis 0.799-1.800 detik tidak tepat karena meskipun, respon sudut rotor stabil namun frekuensi dalam keadaan tidak aman. Oleh karena itu perlu dicari waktu pemutusan kritis saat CB *open* respon sudut rotor dan tegangan dalam range aman.

a. Saat Kondisi Normal, CB open 0.796-1.797 detik (HS 3 Fasa di Paya Geli)



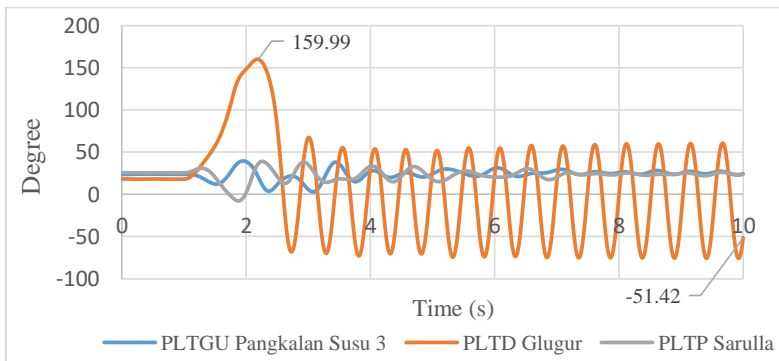
Gambar 4.93 Respon sudut rotor stabil saat CB *open* 0.796 detik

Pada gambar 4.93 respon sudut rotor semua generator mengalami osilasi. Pada generator PLTD Glugur respon sudut rotor mengalami kenaikan maksimal sebesar 156.5 *degree* dan *steady state* pada -11.74 *degree*. Sehingga, disimpulkan bahwa respon sudut rotor stabil.



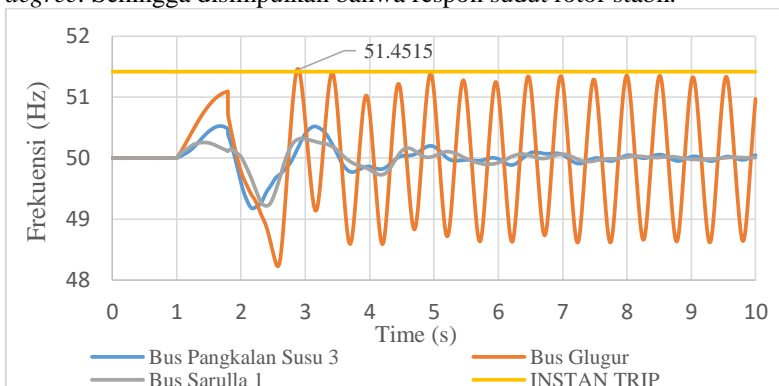
Gambar 4.94 Respon frekuensi stabil saat CB *open* 0.796 detik 1

Pada gambar 4.94 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi. Pada bus PLTD Glugur kenaikan maksimal 51.3485 Hz yang artinya tidak melebihi batas standar yang dilarang yaitu 51.417 Hz menurut batas standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003. Dan *steady state* pada 49.9 Hz masih dalam batas standar frekuensi *continuous operating range* 49.583-50.417 Hz berdasarkan standar standar IEEE Std C37.106-2003.



Gambar 4.95 Respon sudut rotor stabil saat CB *open* 0.797 detik

Pada gambar 4.95 respon sudut rotor semua generator mengalami osilasi. Pada PLTD Glugur respon sudut rotor mengalami kenaikan maksimal sebesar 159.18 *degree* dan *steady state* pada -51.42 *degree*. Sehingga disimpulkan bahwa respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.96 Respon frekuensi tidak saat CB *open* 0.797 detik

Pada gambar 4.96 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi. Pada bus PLTD Glugur kenaikan maksimal 51.4515 Hz yang artinya melebihi batas standar yang dilarang yaitu 51.417 Hz menurut batas standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003. Maka dapat disimpulkan respon frekuensi tidak stabil.

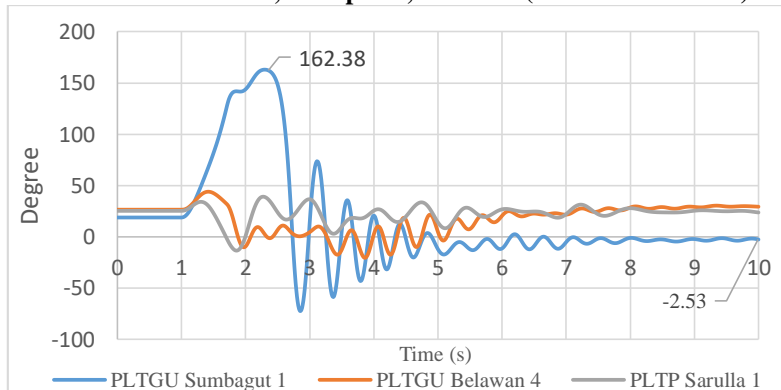
Sehingga dapat disimpulkan, waktu pemutusan kritis yang direkomendasikan berdasarkan hasil simulasi adalah 0.796-1.797 detik. Karena saat CB *open* 0.796 respon sudut rotor dan frekuensi stabil

4.5.6 Kondisi Beban Normal, HS 3 fasa Bus KIM

Pada kondisi normal, nilai arus hubung singkat 3 fasa terbesar ketiga pada bus KIM yaitu pada saluran yang menghubungkan bus KIM ke Percut dengan nilai arus 72.940 kA. Sehingga dicari waktu pemutusan kritis yaitu antara kondisi stabil dan tidak stabil dengan memperhatikan respon sudut rotor dan frekuensi.

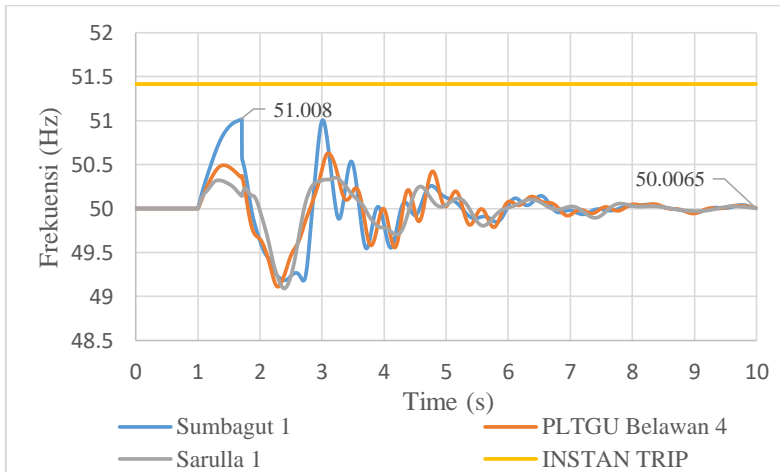
Pada saluran KIM ke Percut pada saat detik ke 0.710 respon sudut rotor dan frekuensi stabil sedangkan saat detik ke 0.711 respon sudut rotor tidak stabil tetapi respon frekuensi tetap stabil. Sehingga dapat disimpulkan waktu pemutusan kritis yang direkomendasikan saat range aman dan tidak aman adalah 0.710-0.711 detik dikarenakan respon sudut rotor dan frekuensi dalam range aman. Hasil simulasi CCT dapat dilihat sebagai berikut :

a. Saat Kondisi Normal, CB open 0,710 detik (HS 3 Fasa di KIM)



Gambar 4.97 Respon sudut rotor stabil saat CB *open* 0.710 detik

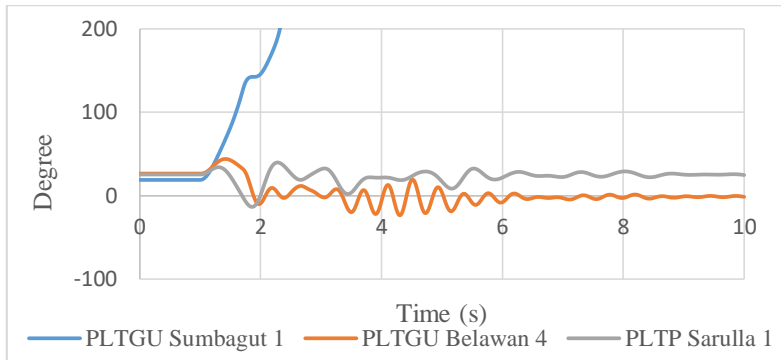
Pada gambar 4.97 respon sudut rotor semua generator mengalami osilasi. Pada PLTD Glugur respon sudut rotor mengalami kenaikan maksimal sebesar 162.38 *degree* kemudian berosilasi menurun hingga respon sudut rotor dibawah 90 *degree* yaitu *steady state* pada -2.53 *degree*. Sehingga disimpulkan bahwa respon sudut rotor stabil.



Gambar 4.98 Respon frekuensi stabil saat CB *open* 0.710 detik

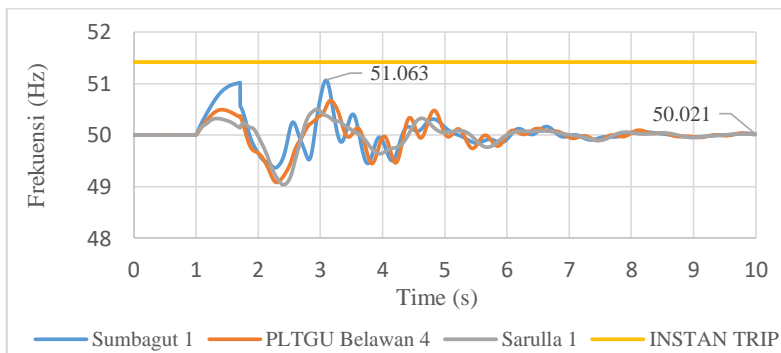
Pada gambar 4.98 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi tidak melebihi batas standar dilarang yaitu 51.417 Hz. Osilasi terbesar terdapat pada bus Sumbagut 1 mencapai kondisi kritis yang nilainya 51.017 Hz dan menurun hingga mencapai *steady state* pada detik ke-10 sebesar 50 Hz masih dalam batas standar frekuensi *continuous operating range* 49.583-50.417 Hz berdasarkan standar standar IEEE Std C37.106-2003.

a. Saat Kondisi Normal, CB open 0.711 detik (HS 3 Fasa di KIM)



Gambar 4.99 Respon Sudut Rotor tidak stabil saat CB *open* 0.711 detik

Pada gambar 4.99 respon sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi. Pada generator PLTGU Belawan 4 dan PLTP Sarulla 1 mengalami osilasi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat kembali *steady state* di bawah 90 *degree*. Sedangkan pada generator PLTGU Sumbagut 1 respon sudut rotor meningkat hingga melebihi batas kestabilan yaitu 180 *degree* maka terjadi slip pole dan terus meningkat karena gangguan tidak segera dihilangkan maka generator PLTGU Sumbagut 1 keluar dari sinkronisasi sistem. Sehingga dapat disimpulkan respon sudut rotor tidak stabil.



Gambar 4.100 Respon frekuensi stabil saat CB *open* 0.711 detik

Pada gambar 4.100 dapat dilihat ketika hubung singkat tiga fasa maka respon frekuensi pada semua bus mengalami osilasi tetapi tidak melebihi batas standar dilarang yaitu 51.417 Hz. Osilasi terbesar terdapat pada bus Sumbagut 1 mencapai kondisi kritis yang nilainya 51.063 Hz dan menurun hingga mencapai *steady state* pada detik ke-10 sebesar 50.021 Hz masih dalam batas standar frekuensi *continuous operating range* 49.583-50.417 Hz berdasarkan standar standar IEEE Std C37.106-2003.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi analisis stabilitas transient pada sistem transmisi sumatera utara 150/275kV, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada *study* kasus pelepasan pembangkit pada PLTU Sumut 2a dengan kapasitas 300 MW saat kondisi *peak* dioperasikan 210 MW sistem kehilangan daya 5% dari total daya pembangkitannya sedangkan saat beban normal pembangkit dioperasikan 150 MW maka saat beban normal sistem kehilangan daya 5% dari total pembangkitannya. Tetapi sistem masih dalam kondisi stabil karena masih bisa di *backup* oleh pembangkit lain.
2. Pada *study* kasus pelepasan satu saluran dari dua saluran, respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan dalam kondisi stabil karena saat satu saluran dari saluran ganda *trip* sistem masih bisa di *backup* oleh satu saluran.
3. Pada *study* kasus pelepasan dua saluran dari saluran ganda, aliran daya terbesar terdapat di saluran yang menghubungkan Binjai ke Paya Geli, respon tegangan mengalami penurunan. Seperti pada saat kondisi beban *peak* di bus Paya Geli mengalami penurunan maksimal 133.1 kV dan kembali meningkat sebesar 138.03 kV. Pada kondisi normal yaitu pada saluran Pangkalan Susu ke Pangkalan Brandan penurunan tegangan maksimal pada bus Pangkalan Susu sebesar 144.6 kV dan *steady state* di 147.7 kV, Masih dalam *range* standar PLN untuk tegangan nominal 150 kV yaitu -10% dan +5% atau 135 kV – 157.5 kV.
4. Pada *study* kasus *single pole auto reclosing* terjadi hubung singkat satu fasa ketanah. Pada saluran Sei Rotan Ke Percut memiliki arus hubung singkat satu fasa ketanah paling besar. Pada kondisi *peak* penurunan tegangan mencapai 68.7% kV dan saat kondisi normal penurunan tegangan sebesar 66.63 % dari tegangan nominalnya 150 kV sehingga menurut standar *voltage sag* SEMI F47 waktu yang diperbolehkan untuk CB *open* adalah 0.2 detik sedangkan waktu penutupan CB yang direkomendasikan PLN adalah 0.9 detik.

5. Pada *study* kasus *critical crearing time* gangguan tiga fasa terbesar pada saluran Sei Rotan Ke Percut saat kondisi beban *peak* rekomendasi yang tepat untuk pemutusan waktu kritis 0.300-0.301 detik karena pada 0.300 detik respon sudut rotor dan frekuensi stabil sedangkan 0.301 detik respon sudut rotor tidak stabil dan respon frekuensi stabil. Sedangkan pada saat kondisi normal rekomendasi waktu pemutusan kritis yang tepat saat 0.625-0.626 detik karena pada 0.625 detik respon sudut rotor dan frekuensi stabil sedangkan saat 0.626 detik respon sudut rotor tidak stabil dan respon frekuensi stabil maka sistem dikatakan tidak stabil. Pada kondisi normal sistem cenderung lebih stabil dibandingkan pada kondisi beban *peak* karena semakin kecil *load* maka sistem akan lebih tahan terhadap gangguan.

5.2 Saran

Saran setelah melakukan tugas akhir ini adalah :

1. Pada tugas akhir ini menganalisis lima kasus diantaranya pelepasan pembangkit terbesar, pelepasan satu saluran dari dua saluran tanpa ada gangguan, pelepasan dua saluran dari saluran ganda tanpa adanya gangguan, *single pole auto reclosing time* dan *critical crearing time*. Mungkin dapat menambahkan lebih banyak kasus seperti *three pole auto reclosing time* atau pelepasan beban.

DAFTAR PUSTAKA

1. Robandi, Imam. “Desain Sistem Tenaga Modern”, Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2006
2. Maria GA, Tang C, Kim J. Hybrid *transient stability analysis*. IEEE Transactions on Power Systems 1990
3. IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*” IEEE Transactions on Power system, vol. 19, no. 2, may 2004.
4. Kundur, P., “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, Inc, 1994.
5. Saadat, H., “*Power System Analysis*”, McGraw-Hill, Inc, 1999.
6. Chiang HD, Wu F, Varaiya P. A BCU method for direct analysis of power system transient stability. IEEE Transactions on Power Systems 1994
7. ANSI/IEEE Std 399-1990, “IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial. Power Systems Analysis (IEEE Brown Book)”
8. PT PLN (Persero). "Perhitungan Setting Relai Auto reclose dan Relai Sinkro Cek", Pusat Pendidikan dan Pelatihan
9. IEEE Std C37.106-2003, “IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants”
10. Pasific Gas and Electric Company, “Voltage Sag Immunity Standards SEMI-F47 and F42”, Power Quality Bulletin, 2007.
11. PT PLN (Persero) No. PDM/PGI/07 : 2014, “Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga (PMT)”

Halaman ini sengaja dikosongkan

INDEKS

A

Automatic Voltage Regulator (AVR), 1,13
Automatic Valve, 13
Auto Recloser, 23,24
Arus, 13, 15, 19, 22, 23

C

Circuit Breaker, 23,24,89
Collapse, 21
Critical Clearing Time (CCT), 25,41,103,112

D

Daya Reaktif, 13
Droop, 20
Daya Suplai, 12
Daya Elektrik, 14,20
Damping, 49,51,57

E

Elektrifikasi, 1
Elektromekanik, 6

F

Flowchart, 42
Frekuensi, 1, 2, 3, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126

G

Gangguan, 1, 2, 4, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 43, 44, 61, 74, 75, 87, 89, 91, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 126
Governor, 1, 19, 20
Generator, 1, 2, 3, 4, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 43, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 69, 71, 73, 75, 78, 80,82, 84, 87, 90, 92, 94, 97, 99, 100, 101, 103, 108, 111, 115, 116, 117, 119, 120, 122, 123, 126
Generator Sinkron, 8, 15, 16, 18

H

Hubung Singkat, 1, 2, 4, 6, 7, 8, 13, 14, 22, 41, 44, 46, 47, 88, 89, 91, 93, 94, 96, 97, 98, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 108, 109, 111, 115, 117, 118, 120, 121, 122, 124, 125

I

Inersia, 49, 51, 57

M

Magnetic Switch, 13
Mode Operasi Droop, 20
Mode Operasi Isochronous, 20

O

Osilasi, 1, 7, 8, 23, 48, 51, 53, 54, 55, 57, 60, 75, 76, 78, 80, 81, 82, 84, 85, 87, 90, 92, 93, 94, 97, 99, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124
Output, 6, 7, 11, 14, 15, 20

P

Periodik, 7
Primeover, 5

R

Range, 1, 26, 27, 50, 52, 54, 56, 60, 63, 65, 67, 69, 72, 74, 76, 78, 81, 83, 85, 88, 90, 91, 93, 95, 96, 97, 100, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 111, 112, 114, 115, 118, 120, 121, 123, 124, 125
Reaktansi Induktif, 8
Resistansi, 8, 11
Rotor, 1, 2, 3, 8, 9, 14, 15, 16, 17, 18, 23, 25, 43, 44, 45, 48, 49, 51, 53, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 80, 82, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 92, 93, 94, 96, 97, 99, 101, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126

S

Steady State, 1, 6, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78,

79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, 123, 124, 125
Single Pole Auto Reclosing, 1, 2, 4, 24, 41, 45, 88, 89
Sistem Transmisi, 1, 23, 29, 30, 78, 80, 125
Swing, 1, 13, 16,
Set Point, 20

T

Three Pole Auto Reclosing, 24
Tugas Akhir, 1, 2, 3, 4, 25, 27, 30, 41, 43, 44, 89, 103
Tegangan, 1, 2, 3, 23, 24, 27, 28, 43, 44, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 81, 82, 83, 84, 86, 88, 89, 91, 93, 94, 95, 96, 98, 100, 101, 103, 125
Torsi Mekanik, 6
Torsi Elektromekanik, 6
Torsi Sinkronisasi, 7
Torsi Redaman, 8, 19
Transient, 1, 2, 3, 4, 14, 15, 25, 41, 43, 44, 45, 61, 74, 103, 125

U

Under Frequency Relay (UFR), 22

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

CCT	: Critical Clearing Time
AVR	: Automatic Voltage Regulator
RUPTL	: Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik
E_G	: Tegangan Internal Generator
E_M	: Tegangan Internal Motor
X_G	: Reaktansi Internal Generator
X_M	: Reaktansi Internal Motor
X_L	: Reaktansi Saluran
J	: Total momen kelembaban dari masa rotor (kg-m ²)
θ_m	: Pergeseran sudut rotor terhadap sumbu yang diam (Rad)
t	: Waktu (detik)
T_a	: Percepatan bersih mpada momen putar (N _m)
T_m	: Poros penggerak yang diberikan <i>primover</i> (pengerak mula)
T_e	: Momen putar elektrik atau elektromagnetik (N _m)
$\omega_m t$: Kecepatan sinkron mesin (radian/ detik)
δ_m	: Sudut pergeseran rotor (<i>mechanical radians</i>)
T_m	: Torsi mekanik
T_e	: Torsi elektrik
P_m	: Daya mekanik
P_e	: Daya elektrik

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap adalah Norma Mahmudah, dilahirkan pada 16 september 1993 di surabaya. Penulis bertempat tinggal di desa jabaran rt 6 rw 2 balong bendo sidoarjo. Penulis adalah anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis lulus dari SDN. Jabaran 2 tahun 2006 kemudian penulis melanjutkan *study* ke SMP. AL Islam Krian lulus tahun 2009 dan pada tahun 2012 lulus dari SMA Al.Islam Krian dan melanjutkan *study* ke D3 Teknik Elektro ITS mengambil bidang *study* komputer kontrol lulus tahun 2015. Kemudian penulis melanjutkan *study* pada program lintas jalur mengambil bidang *study* Teknik Sistem Tenaga di Institut Teknologi Sepuluh November.Penulis. Apabila ingin menghubungi penulis dapat melalui email normamahmudah019@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan